



**Facultad de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales**

Doctorado en Ciencias de la Ingeniería

**Caracterización Hidráulica de los
Procesos de Crecida del Río Pilcomayo en
la Cuenca Baja Superior**

TESIS DE DOCTORADO

Autor: Ing. Civil Alejo J. S. Testa Tacchino

Director: Dr. Ing. Andrés Rodríguez

Córdoba, 2017

Caracterización Hidráulica de los Procesos de Crecida del Río Pilcomayo en la Cuenca Baja Superior

por

MSc. Ing. Alejo Juan Sebastián Testa Tacchino

Dr. Ing. Andrés Rodríguez

Director

COMISIÓN ASESORA:

Dr. Ing. Santiago Reyna

FCEFyN - UNC

Dr. Ing. Juan Carlos Bertoni

FCEFyN - UNC

Dr. Ing. Andrés Rodríguez

FCEFyN – UNC

PREFACIO

El presente trabajo se presenta como Tesis Final de la Carrera de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería dictada en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba y es una continuación y profundización de la Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos presentada en 2015.

Este trabajo ha sido realizado en las oficinas del Instituto Superior de Estudios Ambientales (ISEA), del Laboratorio de Hidráulica, del Centro de Tecnología del Agua de la UNC y del Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, CONICET-UNC). Durante el período de preparación de la Tesis, se trabajó junto a profesionales de diferentes instituciones:

- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.
- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
- Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.
- Instituto Nacional del Agua (INA).
- Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT)
- Servicio Nacional de Meteorológica e Hidrología de Bolivia (SENAMHI).
- Gendarmería Nacional Argentina.
- Laboratorio de Hidráulica, FCEFyN de la UNC.
- Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA), FCEFyN de la UNC.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas – Universidad Nacional del Litoral (FICH - UNL).
- Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata.
- Unidad Provincial Coordinadora del Agua (UPCA), Formosa.
- EVARSA S.A.

El autor ha contado con el apoyo económico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) por medio del Sistema de Becas Doctorales para realizar sus estudios a partir de abril del año 2012.

Además se ha contado con el financiamiento para Proyectos de Investigación de Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba:

- Hidráulica Fluvial del Río Pilcomayo en su Tramo Medio: Monitoreo y Modelado.
Director: Andrés Rodríguez
Co-directora: Mariana Pagot
- Caracterización Experimental de la Hidrodinámica del Río Pilcomayo.
Directora: Leticia Tarrab
Co-director: Horacio Herrero

También con el apoyo de los Proyectos de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo (DE-CTN), Coordinados por el Ing. Juan Hopwood, de la Mesa Fluvial de la DE-CTN

- Manejo de Aguas y Sedimentos
Administrador: Ricardo Giménez
- Monitoreo Integral de la Cuenca del Río Pilcomayo
Administrador: Claudio Laboranti

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

El río Pilcomayo es un río tri-Nacional compartido entre los países Bolivia, Paraguay y Argentina. Es un río no típico y no regulado, con caudales que en crecida alcanzan 28 veces el caudal módulo, elevadas tasas de transporte de sedimentos y troncos, elevada sedimentación y procesos activos de colmatación. Como consecuencia es un río de difícil acceso en crecidas y del que se conoce menos que otros ríos de la cuenca del Plata como el Bermejo, Paraná y Uruguay. Este río internacional posee un acuerdo de distribución de aguas entre Argentina y Paraguay pero no posee tratados o acuerdos de distribución de aguas que incluyan a Bolivia, país que se encuentra aguas arriba. El acuerdo entre Argentina y Paraguay de 1992 contempla la partición “equitativa” de aguas a partir del sistema distribuidor denominado “Embocadura”, pero no contempla las aguas que escurren a estos países como consecuencia de los desbordes naturales aguas arriba.

El objetivo de esta tesis es mejorar el conocimiento del Río Pilcomayo y sus distribuciones naturales de caudales entre los tres países, cuantificar los caudales provenientes de Bolivia hacia aguas abajo y los ingresantes a Argentina aguas arriba de Misión La Paz. Esta tesis pretende aportar bases técnicas para un futuro tratado de distribución de aguas tripartita entre Argentina, Paraguay y Bolivia.

Se cuenta con el antecedente de la tesis de maestría “Caracterización de desbordes del Río Pilcomayo entre Villamontes y Misión La Paz” (Testa Tacchino, 2015) en la que se presentan herramientas técnicas unidimensionales para el análisis de la crecida del año 2013. En la presente tesis se estudian las crecidas del año 2014 y 2015 y se aporta una modelación hidráulica bidimensional de la zona de desbordes “El Chañaral”, el principal desborde en el tramo entre VM y MLP.

Para abordar los estudios se cuenta con la estación de aforos Villamontes, Bolivia (VM) que nos permite la cuantificación de aportes líquidos y sólidos desde Bolivia que ingresan a Argentina/Paraguay y la estación de aforos de Misión La Paz, Argentina (MLP) que nos brinda una estimación de los caudales vertidos por desbordes y los caudales que continúan por el cauce hacia la “Embocadura”. Esta información integrada a productos de satélite y en comparación con información de crecidas anteriores permite registrar información valiosa sobre los caudales que abandonan el cauce del Río Pilcomayo y fundamental para estimar la distribución de caudales entre países. Esta información ha sido volcada en una metodología desarrollada inicialmente en Testa (2015) que en esta tesis se valida y profundiza. La modelación hidráulica bidimensional permite, en base al estado del conocimiento topobatimétrico de la zona, estimar la distribución de caudales para los desbordes estudiados, “El Chañaral” y “La Garrapata”. En trabajos futuros será necesario extender el análisis a los otros desbordes.

Las conclusiones de los temas abordados permitieron alcanzar los objetivos planteados y publicar los resultados.

SUMMARY

The Pilcomayo River is a tri-National river shared among the countries Bolivia, Paraguay and Argentina. It is a non-typical and non-regulated river, with flow rates that reach 28 times the modulus, high rates of solid and trunks transport and with high sedimentation and active processes of clogging. As a consequence, it is a river that is difficult to access in floods and it is less known than other rivers in the Plata basin such as Bermejo, Paraná and Uruguay. This international river has a water distribution agreement between Argentina and Paraguay but does not have treaties or water distribution agreements that include Bolivia, a country that is upstream. The agreement between Argentina and Paraguay of 1992 provides for the "equitable" partition of water from the distributor system called "La Embocadura", but does not contemplate the waters that drain to these countries as a consequence of the natural overflows upstream.

The objective of this thesis is to improve the knowledge of the Pilcomayo River and its natural distributions of flows between the three countries, to quantify the flows from Bolivia downstream and the entrants to Argentina upstream from Misión La Paz. This paper aims to provide technical bases for a future tripartite water distribution treaty among Argentina, Paraguay and Bolivia.

It has the antecedent of the master's thesis "Characterization of overflows of the Pilcomayo River between Villamontes and La Paz Mission" (Testa Tacchino, 2015) in which unidimensional technical tools are presented for the analysis of the flood of the year 2013. This thesis studies the floods of 2014 and 2015 and provides a two-dimensional hydraulic modeling of the overflow zone "El Chañaral", the main overflow in the section between VM and MLP.

The Villamontes gauge station, Bolivia (VM) allows us to quantify the water and solid flows contributions from Bolivia entering Argentina / Paraguay and the gauge station of Misión La Paz, Argentina (MLP) gives us an estimate of overflows and those that continues downstream along the channel to the "Embocadura". This information, integrated with satellite products and in comparison with information from previous floods, allows us to record valuable information about the flows that leave the Pilcomayo River and fundamental to estimate the distribution of flows among countries. This information has been focused on a methodology developed initially in Testa (2015), which is validated and deepened in this thesis. The two-dimensional hydraulic modeling allows, based on the topobathymetric knowledge state of the zone, to estimate the flow distribution for the overflows studied, "El Chañaral" and "La Garrapata". In future work it will be necessary to extend the analysis to the other overflows.

The conclusions of the topics covered allowed the objectives to be achieved and the results published.

ÍNDICE

<u>PREFACIO</u>	<u>I</u>
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	<u>III</u>
<u>RESUMEN</u>	<u>V</u>
<u>SUMMARY</u>	<u>VII</u>
<u>ÍNDICE</u>	<u>IX</u>
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	<u>XI</u>
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	<u>XIX</u>
<u>1. INTRODUCCIÓN</u>	<u>1</u>
1.1. OBJETIVOS	7
1.2. ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUAS	8
1.3. METODOLOGÍA	10
<u>2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE</u>	<u>13</u>
2.1. BREVE HISTORIA DE LOS TRATADOS BINACIONALES Y TRINACIONALES	13
2.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS	18
2.3. CONO ALUVIAL	19
2.4. MORFODINÁMICA	22
2.5. DESBORDES	28
2.6. AVULSIÓN	33
<u>3. HIDROMETRÍA</u>	<u>37</u>
3.1. ESTACIÓN EN VILLAMONTES	37
3.2. ESTACIÓN EN MISIÓN LA PAZ	44
<u>4. HIDROLOGÍA DEL TRAMO EN ESTUDIO</u>	<u>53</u>
4.1. CURVAS Q-D-T	53
4.2. CURVA DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DE CAUDALES	57
4.3. CORRELACIÓN NIÑO/NIÑA CON CRECIDAS/SEQUIAS	58
4.4. SEDIMENTOS	62

5. ANTECEDENTES DE CAMPO	70
5.1. PRIMERA CAMPAÑA	70
5.2. SEGUNDA CAMPAÑA	71
5.3. TERCERA CAMPAÑA	73
6. ANÁLISIS DE DESBORDES EN EL TRAMO INVESTIGADO	77
6.1. APLICACIÓN DE PRODUCTOS DE TELEDETECCIÓN	79
6.2. ANÁLISIS DE CRECIDAS (1999-2015)	93
7. MODELACIÓN NUMÉRICA	117
7.1. MODELACIÓN HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL	117
7.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA BIDIMENSIONAL	135
8. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DE CRECIDAS INCLUYENDO EL MONITOREO DEL LECHO EN LAS SECCIONES DE AFORO.	145
8.1. ANÁLISIS DE LA CRECIDA DEL AÑO 2013	146
8.2. ANÁLISIS DE LA CRECIDA DEL AÑO 2014	153
8.3. ANÁLISIS DE LA CRECIDA DEL AÑO 2015	163
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	169
BIBLIOGRAFÍA	171
ANEXO I: APORTES AL CONOCIMIENTO	179

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Mapa Político de la cuenca del Plata, (Dirección Ejecutiva, 2014).	1
Figura 2.- Mapa Político de la cuenca del Río Pilcomayo (elaboración propia)	2
Figura 3.- Esquema de Pendientes medias, cuenca alta y cuenca baja (Lagranja, 2001).	4
Figura 4.- Identificación de Desbordes, Localidades de Referencia y el origen del bañado La Estrella.	5
Figura 5.- Zona de Desborde en Misión Las Vertientes, Campaña enero 2014.	6
Figura 6.- Esquema de cauce “colgado” y del proceso de formación.	6
Figura 7.- Esquema de distribución de aguas desde la salida de Bolivia hasta MLP.	8
Figura 8.- Esquema de distribución de aguas en el sistema distribuidor “Embocadura”.	9
Figura 9.- Ubicación en la cuenca (Kopaliani & Georgievsky, 1993)	13
Figura 10.- Laudo Hayes	14
Figura 11.- Vista de la zona de Embocadura. Satélite IRS, fecha 14/11/12 (Baldissoni, 2013).	16
Figura 12.- Erogación de caudales hacia Argentina y Paraguay entre los años 2009 y 2011 (Baldissoni, 2013).	18
Figura 13.- Características Principales del abanico aluvial del Pilcomayo (Iriondo, Colombo, & Kröhling, 2000).	19
Figura 14.- Ubicación de la zona de Embocadura dentro del abanico fluvial (Halcrow, 2010).	20
Figura 15.- Retroceso del Río Pilcomayo entre 1905 y 2006, (Halcrow, 2010).	20
Figura 16.- Mapa del Retroceso del Cauce del Río Pilcomayo, 1974- 1993 (Kopaliani & Georgievsky, 1993).	21
Figura 17.- Retroceso del Río Pilcomayo desde 1975 (Kopaliani & Georgievsky, 1993) (Halcrow, 2010).	22
Figura 18.- Tipos de cauce en el tramo de Villamontes a Misión La Paz. Imagen Landsat 25/01/2014.	23
Figura 19.- Imagen SRTM de zonas próximas a Santa Victoria. Se identifican dos perfiles Transversales. Fuente: Elaboración Propia	24
Figura 20.- Perfil 1 (Noreste – Sudoeste). Fuente: Elaboración Propia	25
Figura 21.- Perfil 2 (Norte – Sur). Fuente: Elaboración Propia	25
Figura 22.- Esquema de deltas superior (rojo) e inferior (azul) sobre mapa de unidades geológicas, a partir de Halcrow y Serman (2007).	25
Figura 23.- Mapa de puntos críticos y de escurrimientos (Cafaro E. D., 2010).	26
Figura 24.- Erosión de Barrancas (Gobierno de la Provincia de Salta, 2013)	28
Figura 25.- Mapa que muestra dónde se encontraba el Estero Patiño (Salúm Flecha, 1983).	28
Figura 26.- Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (Amarilla L. , 2014)	29
Figura 27.- Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (Amarilla L. , 2014)	30
Figura 28.- Derrame en tapón, aguas relativamente altas, ver la desaparición del cauce (Martín Vide, Amarilla, Gamarra, & Zárate, 2007)	30
Figura 29.- Desborde la Gracia (Gobierno de la Provincia de Salta, 2013)	31
Figura 30.- Desborde del Río Pilcomayo (Gobierno de la Provincia de Salta, 2013)	31
Figura 31.- Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas arriba de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral, 2012).	32
Figura 32.- Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas abajo de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral, 2012).	33
Figura 33.- Esquemas de tipos de avulsión (Slingerland & Smith, 2004).	34
Figura 34.- Esquema de componentes principales de un sistema con avulsión. (Makaske, 2001)	35
Figura 35.- Líneas de centro del cauce en los años 1976, 1996, 1999 y 2008 digitalizadas (García, y otros, 2014)	36

Figura 36.- Localización de las Estaciones en Villamontes y Misión La Paz (Dirección Ejecutiva, 2014).	37
Figura 37.- Curva Altura-Caudal a partir de aforos en Villamontes desde 26/03/2004 al 29/4/2014, SENAMHI. Fuente: Elaboración Propia.	38
Figura 38.- Estación de aforo en Villamontes, Bolivia, Vista hacia aguas abajo, julio 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	38
Figura 39.- Sensor Kalesto y Torre de sección de aforo julio 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	39
Figura 40.- Vista hacia aguas arriba, julio 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	39
Figura 41.- Sección de aforo por vagoneta; septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi, & Testa Tacchino, 2013).	39
Figura 42.- Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.	40
Figura 43.- Curva H-Q para lecturas de escala hasta 0,88 m.	40
Figura 44.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 0,88 m a 2,08 m.	41
Figura 45.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 2,08 m.	41
Figura 46.- Lecturas de escala durante enero y febrero de 2014.	42
Figura 47.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)	42
Figura 48.- Niveles durante los aforos enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)	42
Figura 49.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)	43
Figura 50.- Niveles durante los aforos febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)	43
Figura 51.- Curva Altura- Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/9/1972 al 20/8/2009, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia.	44
Figura 52.- Curva Altura - Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/1/2010 al 24/5/2014, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia.	45
Figura 53.- Sección de aforo en Misión La Paz, Argentina, al frente Pozo Hondo, Paraguay, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	45
Figura 54.- Vista hacia aguas abajo de la sección de aforo, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	46
Figura 55.- Vista hacia aguas arriba de la sección de aforo de Misión La Paz, se observa el puente internacional, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	46
Figura 56.- Puente internacional y Sensor de Nivel (OTT), vista desde aguas abajo, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	46
Figura 57.- Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.	47
Figura 58.- Curva H-Q para lecturas de escala hasta 3,12 m.	47
Figura 59.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 3,12 m hasta 4,10 m.	48
Figura 60.- Curva H-Q para lecturas de escala por encima de los 4,10 m.	48
Figura 61.- Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014)	50
Figura 62.- Niveles durante los aforos 2014 en MLP. (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014)	50
Figura 63.- Lecho y superficie de Agua medidos en el Río Pilcomayo en la Sección misión la Paz, enero 2013.	51
Figura 64.- Relación entre Caudal y Caudal Específico	51
Figura 65.- Elementos característicos de una sección considerados para el cálculo de la erosión potencial generalizada transitoria (Farías, 2011).	52
Figura 66.- Curvas QDT para Misión La Paz, Curvas de Probabilidades Gumbel.	55
Figura 67.- Curvas QDT para Villamontes, Curvas de Probabilidades Gumbel.	57

Figura 68.- Curvas de Excedencia para VM y MLP.	58
Figura 69.- Curvas de Excedencia para VM y MLP.	58
Figura 70.- Ubicación de las regiones ENOS Fuente: http://www.inocar.mil.ec/modelamiento/el_nino/nino_generalidades.php	59
Figura 71.- Serie de Caudales medios anuales	60
Figura 72.- Espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes	60
Figura 73.- Caudal e indicador Niño 1+2 filtrados con un filtro pasabanda entre 3 y 7 años.	61
Figura 74.- Caudal e indicador Niño 1+2 filtrados con un filtro pasabanda entre 4 y 6 años.	61
Figura 75.- Caudal e indicador Niño 3.4 filtrados con un filtro pasabanda entre 3 y 7 años.	62
Figura 76.- Caudal e indicador Niño 3.4 filtrados con un filtro pasabanda entre 4 y 6 años.	62
Figura 77.- Rango de curvas granulométrica del material del lecho del río en Villamontes (EVARSA, 2007).	63
Figura 78.- Curva granulométrica del material del lecho del río en la zona de la embocadura (Pool, Usai, & Baas, 1993).	63
Figura 79.- Secciones de muestreo de granulometría según Orfeo (2012)	64
Figura 80.- Series de Caudales Líquidos y Sólidos fino y grueso entre 1993 y 2012	66
Figura 81.- Relación entre caudal líquido y caudal sólido de fondo o grueso (serie 1993-2014).	67
Figura 82.- Relación entre caudal líquido y caudal sólido fino, carga en suspensión (serie 1993-2014).	67
Figura 83.- Relación entre caudal sólido grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).	68
Figura 84.- Relación entre caudal líquido y caudales sólidos grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).	68
Figura 85.- Relación entre caudal líquido y caudal sólido total (serie 1993-2014).	69
Figura 86.- Canal Las Torres y taponamiento del cauce seco argentino, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi, & Testa Tacchino, 2013)	70
Figura 87.- Defensa de D'Orbigny (Bolivia) septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi, & Testa Tacchino, 2013)	70
Figura 88.- Defensa en Las Vertientes, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	71
Figura 89.- Aforo con Moliente sobre vagón. Sección MLP, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	71
Figura 90.- Reconstrucción de la sección a partir de las Capturas de video de las 11 subsecciones del río, ancho total de superficie de agua 90 m. Se observan las ramas depositadas en las pilas centrales (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	72
Figura 91.- Instantáneas para el cálculo de la Velocidad Superficial, Imágenes obtenidas por software PTVlab (CETA-UNC), (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	72
Figura 92.- Configuración del sistema para la implementación de la técnica de PIV. La cámara digital se ha montado sobre una grúa desde la margen izquierda del río (Szupiany, y otros, 2014).	74
Figura 93.- Contraste entre perfiles transversales de velocidad medidos en la región cercana a la superficie libre con las diferentes técnicas (Szupiany, y otros, 2014).	75
Figura 94.- Contraste entre la batimetría de la sección transversal relevada durante la medición de caudales con las diferentes técnicas en la sección de aforo de Villamontes (Szupiany, y otros, 2014).	75
Figura 95.- Campo de Velocidades de flujo [m/s] registrado con ADCP "Workhorse Río Grande" de 600 kHz de frecuencia, utilizando una plataforma móvil. Las progresivas indican distancia desde margen izquierda (Szupiany, y otros, 2014).	75
Figura 96.- Detalle de ubicación. (Elaboración Propia)	77

Figura 97.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Bandas: 3 (roja), 2 (verde) y 1 (azul) en escala de grises.	79
Figura 98.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición color natural, Bandas 321(RGB).	79
Figura 99.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición falso color convencional, Bandas 432.	80
Figura 100.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Comp. falso color mejorado, Izq. Bandas 453 y Der. Bandas 543	80
Figura 101.- Cobertura histórica de las imágenes Landsat	81
Figura 102.- Frecuencias de onda que capta cada Banda en Landsat 7 y Landsat 8	82
Figura 103.- Representación satélite Terra – ASTER-GDEM	83
Figura 104.- Representación taxi espacial SRTM (CIAT, 2014)	84
Figura 105.- Topografía ASTER, Río Pilcomayo y localidades de referencia.	85
Figura 106.- Secciones en el tramo Villamontes a Misión La Paz por el Río Pilcomayo, fondo DEM de SRTM.	86
Figura 107.- Imagen SRTM	87
Figura 108.- Imagen ASTER	87
Figura 109.- Diferencia entre Imágenes ASTER y SRTM	87
Figura 110.- Comparación de los perfiles longitudinales según ASTER GDEM y SRTM.	90
Figura 111.- Perfiles longitudinales por margen derecha a partir de ASTER, SRTM y cartografía IGM-Bolivia.	90
Figura 112.- Comparación de topografías extraídas de ASTER GDEM y SRTM en Diferentes secciones transversales a lo largo del Río Pilcomayo	91
Figura 113.- Sección de VM según MDT ASTER, SRTM y dos aforos con 835 m ³ /s y 584 m ³ /s de caudal.	92
Figura 114.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 1999.	95
Figura 115.- Imagen Landsat 1999107 (17/04/1999)	95
Figura 116.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2005.	96
Figura 117.- Imagen 2005051 (20/02/2005).	96
Figura 118.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2006.	97
Figura 119.- Imagen 2006030 (30/01/2006)	97
Figura 120.- Imagen 2006038 (07/02/2006).	97
Figura 121.- Imagen 2006046 (15/02/2014).	98
Figura 122.- Imagen 2006054 (23/02/2014).	98
Figura 123.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2007.	99
Figura 124.- Imagen Landsat 2007081 (22/03/2007)	99
Figura 125.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2008.	100
Figura 126.- Imagen 2008036 (05/02/2008).	100
Figura 127.- Imagen 2008044 (13/02/2008).	100
Figura 128.- Imagen 2008060 (29/02/2008).	101
Figura 129.- Imagen 2008068 (16/03/2008).	101
Figura 130.- Imagen 2008076 (16/03/2008).	101
Figura 131.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2009.	103
Figura 132.- Imagen Landsat 2009062 (03/03/2009)	103
Figura 133.- Imagen Landsat 2009063 (04/03/2009)	103
Figura 134.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2013	104
Figura 135.- Imagen 2013025 (25/01/2013).	104
Figura 136.- Hidrogramas correspondientes a la crecida del año 2014	105
Figura 137.- Delimitación de desbordes, Izq.) Imagen Landsat 8, 5/2/2014 Der.) Imagen Landsat 7, 6/02/2014	106
Figura 138.- Hidrogramas correspondiente a la crecida del año 2015	106
Figura 139.- Delimitación de desborde. Imagen Landsat 8, 17/2/2015	107

Figura 140.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de El Chañaral, 273 m. _____	108
Figura 141.- Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, El Chañaral. _____	108
Figura 142.- Desborde El Chañaral (En blanco) sobre mapa de geomorfología (Halcrow & Serman, 2007) _____	109
Figura 143.- Imagen Landsat 2008036, se observa que las aguas del desborde La Gracia arriban al bañado La Estrella _____	110
Figura 144.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de La Gracia, 256 msnm. _____	110
Figura 145.- Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, La Gracia. _____	111
Figura 146.- Desborde La Gracia (En blanco) sobre mapa de geomorfología (Halcrow & Serman, 2007) _____	111
Figura 147.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde Pozo Hondo, 258 msnm. _____	112
Figura 148.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde La Puerta, 275 msnm. _____	113
Figura 149.- Superposición de Desbordes. _____	114
Figura 150.- Trayectoria de los Desbordes. _____	115
Figura 151.- Relación entre el área cubierta por los desbordes con los caudales pico en VM. _	115
Figura 152.- Curva que relaciona longitud y el área anegada para los cuatro desbordes. _____	116
Figura 153.- Planimetría de las secciones creadas en HEC-RAS e identificación de localidades de interés. _____	118
Figura 154.- Esquema del proceso de cálculo del Software HEC-RAS (Blade, Sánchez-Juni, Sánchez, Niñerola, & Gómez, 2009). _____	119
Figura 155.- Esquema de cálculo de Preissman de los cuatro puntos . _____	120
Figura 156.- H-Q para VM (1973-2013) $Q = 187,1 H - 0,485/3$, $R^2 = 0,95$ _____	121
Figura 157.- H-Q para MLP (2013) en Rama Ascendente $Q = 180,4H - 2,16753$ $R^2=0,98$ _____	121
Figura 158.- H-Q para MLP (2013) en Rama Descendente $Q = 124,10H - 1,53553$ $R^2=0,87$ _____	121
Figura 159.- Condición de Entrada Aguas Arribas, Hidrograma de Crecida del año 2013. _____	122
Figura 160.- Efecto del vertedero lateral en la modelación 1D. _____	122
Figura 161.- Calibración de modelo unidimensional con imágenes satelitales (Corral, 2010). _	123
Figura 162.- Hidrograma Observado en MLP. _____	123
Figura 163.- Opciones de Cálculo y Tolerancias utilizadas para modelar. _____	125
Figura 164.- Comparación de Resultados de la Modelación con diferentes n de Manning, SRTM. _____	127
Figura 165.- Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación) Geometría SRTM. _____	129
Figura 166.- Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación), Geometría ASTER. _____	129
Figura 167.- Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER. _____	129
Figura 168.- Modelo Lateral impuesto a la modelación. _____	130
Figura 169.- Sección en progresiva de El Chañaral. _____	130
Figura 170.- Zona por debajo de los 273 m (en azul), se activa El Chañaral. _____	131
Figura 171.- Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT SRTM. _____	131
Figura 172.- Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT ASTER. _____	131
Figura 173.- Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT SRTM. _____	132
Figura 174.- Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT ASTER. _____	132
Figura 175.- Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER. _____	133
Figura 176.- Superposición Imagen Landsat 25/01/2013 y resultados HEC-RAS, en rojo. _____	133
Figura 177.- Modelo digital de terreno de la zona de Estudio _____	135

Figura 178.- Malla de cálculo con interpolación del MDT en zona de estudio y condiciones de borde.	136
Figura 179.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=2500 \text{ m}^3/\text{s}$.	137
Figura 180.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$.	137
Figura 181.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$.	138
Figura 182.- Velocidad promediada en la vertical $Q=4000 \text{ m}^3/\text{s}$.	138
Figura 183.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=5000 \text{ m}^3/\text{s}$.	139
Figura 184.- Secciones de cálculo de caudales.	140
Figura 185.- Distribución de caudales según caudal de ingreso.	141
Figura 186.- Caudales aguas arriba vs aguas abajo de los desbordes en estudio.	142
Figura 187. Superposición de desborde modelado para un caudal de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Img. Landsat 3/3/2009). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral.	142
Figura 188. Superposición de desborde modelado para un caudal de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Img. Landsat 25/1/2013). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul y rojo el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral y La Garrapata, respectivamente.	143
Figura 189.- Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.	146
Figura 190.- Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz.	146
Figura 191.- Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.	147
Figura 192.- Imagen Landsat 2013025 (25/01/2013).	148
Figura 193.- Relación Velocidad de Avance vs. Días transcurridos desde activación del desborde El Chañaral.	149
Figura 194.- Relación Área Inundada vs Longitud del desborde El Chañaral.	149
Figura 195.- Contornos de áreas inundadas por el desborde El Chañaral en diferentes eventos según extensión [km^2]	151
Figura 196.- Caudales que arriban a MLP, observado y modelado.	152
Figura 197.- Hidrograma modelado de los desbordes, efecto del vertedero lateral.	152
Figura 198.- Movimiento del Fondo y Superficie de Agua, Crecida año 2013.	153
Figura 199.- Lecturas de escala medias horarias para Villamontes y Misión La Paz, 2014.	154
Figura 200.- Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz, 2014.	154
Figura 201.- Niveles base y pico de la crecida en VM y MLP, 2014.	155
Figura 202.- Delimitación de desbordes, (Izq.) Imagen Landsat 8, 5/2/2014 Der.) Imagen Landsat 7, 6/02/2014	156
Figura 203.- Días desde que se activa el desborde vs velocidad de avance (distancia / días recorridos por el desborde hasta la fecha de la imagen).	157
Figura 204.- Relación entre área inundada y extensión del desborde.	158
Figura 205.- Contornos de áreas inundadas por el desborde El Chañaral en diferentes eventos según extensión [km^2]	159
Figura 206.- Comparación de hidrogramas modelado y observado en MLP.	160
Figura 207.- Hidrograma simulado del desborde concentrado en El Chañaral para la crecida del año 2014.	161
Figura 208.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)	162
Figura 209.- Niveles durante aforos, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)	162
Figura 210.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)	162

Figura 211.- Niveles durante aforos, febrero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)	162
Figura 212.- Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi y Testa Tacchino, 2014)	163
Figura 213.- Niveles durante aforos, 2014 en MLP. (Cristanchi y Testa Tacchino, 2014)	163
Figura 214.- Lecturas de escala medias horarias para Villamontes y Misión La Paz, 2015.	164
Figura 215.- Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz, 2015.	164
Figura 216.- Niveles base y pico de la crecida en VM y MLP, 2015.	165
Figura 217.- Delimitación de desborde, Imagen Landsat 8, 17/2/2015	165
Figura 218.- Relación Área Inundada vs Longitud del desborde La Gracia.	166
Figura 219.- Comparación de hidrogramas modelado y observado, en MLP.	167
Figura 220.- Hidrograma simulado del desborde concentrado en El Chañaral para la crecida del año 2015.	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Cotas de Localidades de la cuenca del Río Pilcomayo.	4
Tabla 2.- Comparación de Caudales diarios líquidos máximos, mínimos anuales y módulo de los Ríos Pilcomayo, Bermejo y Paraná.	4
Tabla 3.- Ríos con mayor transporte de sedimentos, tasa media anual (Lagranja, 2001).	5
Tabla 4.- Aportes de Caudales sólidos, líquidos y tasa de erosión (Jack Klzobzi, Ramette, & Roquero, 1997)	23
Tabla 5.- Localización de Zonas de Desbordes y Estado de Avulsión (Farías & Cafaro, 2010).	36
Tabla 6.- Coeficientes para las formulaciones de Erosión generalizada transitoria (Farías, 2011).	52
Tabla 7.- Caudales máximos medios anuales para duración de: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 10 días.	53
Tabla 8.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Gumbel.	54
Tabla 9.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Log-Pearson III.	54
Tabla 10.- Ejemplo de utilización de las curvas para el caso de la crecida del año 2013.	55
Tabla 11.- Caudales medios diarios máximos anuales para diferentes duraciones	56
Tabla 12.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en VM, Curva de Probabilidad Gumbel.	56
Tabla 13.- Resumen de las tres frecuencias dominantes y sus correspondiente periodo.	60
Tabla 14.- Tamaño de Finos en Suspensión, MLP (Brea & Spalletti, 2011).	64
Tabla 15.- Granulometría en Sedimentos de Fondo en el centro del cauce, MLP (Brea & Spalletti, 2011).	64
Tabla 16.- Tamaño de Finos en Suspensión, en tres verticales, MLP (Orfeo, 2012).	65
Tabla 17.- Granulometría en Sedimentos de Fondo en tres verticales, MLP (Orfeo, 2012)	65
Tabla 18.- Cálculo del coeficiente de Manning (n) a partir de aforos con flotadores, lecturas de escala mayor a 5 m (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).	73
Tabla 19.- Resolución y características del Satélite Landsat 7.	81
Tabla 20.- Resolución y características del Satélite Landsat 8.	82
Tabla 21.- Características MDT de ASTER-GDEM (ERSDAC, 2003).	83
Tabla 22.- Características MDT de SRTM (USGS, 2014),	84
Tabla 23.- Caudales pico del hidrograma de crecida y caudales en la fecha de la imagen; longitud y áreas de las zonas inundadas por desbordes calculados a partir de las imágenes. Q_p es el caudal pico de la crecida, Q el caudal medio diario en la fecha de la imagen y ΔT_{pico} es el tiempo que demora en arribar el pico entre VM y MLP.	94
Tabla 24.- Progresivas de puntos de interés	118
Tabla 25.- Coeficientes de Rugosidad de Manning (Cafaro & Ramonell, 2007).	127
Tabla 26.- Cálculo de n de Manning a partir de formulaciones potenciales.	128
Tabla 27.- Caudales pico del hidrograma de crecida y Caudales en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por desbordes calculados a partir de las imágenes (Testa Tacchino 2015).	140
Tabla 28.- Caudales Calculados para los desbordes y aguas abajo, en el cauce (m^3/s).	141
Tabla 29.- Incidencia porcentual de los desbordes.	141
Tabla 30.- Tiempo de tránsito y propagación de la Crecida a partir de lecturas de escala en VM y MLP	147
Tabla 31.- Duración base del hidrograma de crecida y duración del Pico.	148
Tabla 32.- Caudal pico del hidrograma de crecida y Caudal en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por los desbordes.	149
Tabla 33.- Tabla resumen de las características de los desborde para el año 2014. a) Duración de desborde, b) Longitud y Área de desborde.	156

Tabla 34.- Caudal pico del hidrograma de crecida y Caudal en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por los desbordes. 166

1. Introducción

La cuenca hidrográfica del río Pilcomayo se sitúa aproximadamente entre los 19° y 26° de Latitud Sur y entre los 57° y 67° de Longitud Oeste, integra la gran Cuenca del Plata y está conformada por una extensa área compartida entre Argentina, Bolivia y Paraguay (Figura 1).



Figura 1.- Mapa Político de la cuenca del Plata, (Dirección Ejecutiva, 2014).

La Cuenca del Plata en el eje Paraguay – Paraná tiene tres características distintivas: La primera es el sistema orográfico de la Cordillera de los Andes hacia el oeste, así como el Amazonas, el segundo es el Escudo Brasileño hacia su cuadrante noreste, la tercera es una gran planicie entre ambas, que disminuye su pendiente suavemente hacia el río de la Plata. Otros elementos geomorfológicos importantes de la Cuenca del Plata son el Pantanal, una red de humedales poco profundos que abarca más de 140.000 km² hacia el norte, y el Chaco Americano, una extensa planicie que se desarrolla hasta el este de la cuenca. El Chaco tiene un clima semiárido y un escaso sistema de drenaje debido a su poco gradiente. Los ríos Bermejo, Pilcomayo y Salado son los encargados de drenar esta región. Estos ríos se originan en la cara este de los Andes con una elevada carga de sedimento que no puede ser soportada por las llanuras del Chaco. Como consecuencia, los ríos en el chaco, por lo general, están en situación de agradación con inestabilidades

de las márgenes que dificultan la utilización de los recursos hídricos que son vitales en las regiones semiáridas (Khalid & Bazoberry Otero, 1990).

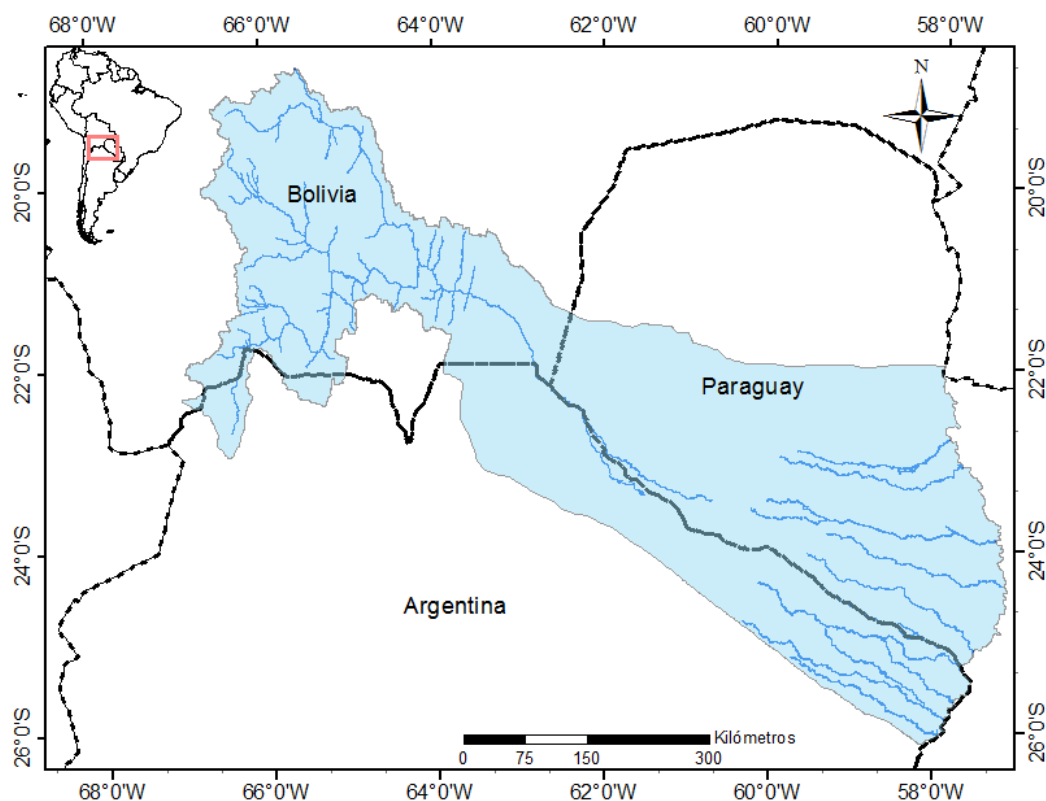


Figura 2.- Mapa Político de la cuenca del Río Pilcomayo (elaboración propia)

La cuenca del Río Pilcomayo abarca una superficie de aproximadamente 290.000 km², con una población estimada de 1.500.000 de habitantes. A lo largo de su vasta superficie la variabilidad climática y geológica-geomorfológica han conformado un gran número de paisajes, con hábitats de más de 20 etnias aborígenes que han ido moldeando sus prácticas culturales en función del ambiente y las circunstancias de su historia.

El Río Pilcomayo es considerado uno de los ríos con mayor cantidad de transporte de sedimentos en el mundo con una tasa media anual de 125 millones de toneladas. Esta particularidad constituye el rasgo natural por excelencia de la región (Dirección Ejecutiva, 2014).

El Río Pilcomayo nace y forma la red fluvial de su cuenca activa (la cuenca en donde las aguas se originan) casi totalmente en la República de Bolivia. En esa región de la cuenca alta se producen las precipitaciones que forman la parte más significativa de los caudales líquidos y sólidos en su curso principal y que son las que determinan y ocasionan los problemas actuales. Se divide entonces la cuenca del Río Pilcomayo en dos cuencas: La cuenca alta, donde el Pilcomayo es un río de montaña con un largo de 500 kilómetros y la cuenca baja o Cuenca Chaqueña, que al abandonar los Andes se convierte en un río de llanura, con un largo de 785 kilómetros. Dentro de la cuenca Chaqueña se divide el Río Pilcomayo en el Río Pilcomayo Superior y Río Pilcomayo Inferior respectivamente, que corresponde a un tramo de 545 y 240 kilómetros. El Río Pilcomayo Superior se halla entre

la ciudad de Villamontes en Bolivia y las poblaciones de Salto Palmar/Fortín Cabo en Argentina/Paraguay. El Río Pilcomayo Superior presenta una geometría de cauce colgado, lo que sumado a su traza meandriforme y la no regulación de sus caudales, propician condiciones de alto riesgo de avulsión, es decir cambio repentino del cauce y formación de uno nuevo, favorecida quizás por una crecida donde el flujo desborda en puntos específicos o críticos (Pool & Van Duijne, 1996). Uno de los problemas principales y más llamativos del Río Pilcomayo es el proceso de colmatación o taponamiento que padece, que viene acompañado de un retroceso de su cauce. Se reconoce como causa del taponamiento total del cauce a los árboles y troncos, que al ser arrastrados por las crecidas forman tapones, denominadas “paleríos” en la zona. Estos diques, inicialmente permeables, junto al limo y barro aportados por el río, forman extensos rellenos hidráulicos en toda la franja correspondiente al cauce del río (Hopwood, 2003). El retroceso del cauce se podría deber a las bajas pendientes, en esta zona de 0,3 ‰ y a leves movimientos orogénicos (Martín Vide, Amarilla, Gamarra, & Zárate, 2007). El taponamiento actual se sitúa en el Río Pilcomayo Superior a una distancia de 220 kilómetros aguas abajo de Villamontes y 65 kilómetros aguas abajo del Punto Trifinio Esmeralda, punto límite entre Argentina, Paraguay y Bolivia.

Vale destacar que no hay, y no habría tampoco en la historia reciente, una conexión superficial directa o física entre el Río Pilcomayo en la cuenca alta y su desembocadura en el Río Paraguay, es decir, no existe una conexión superficial entre el Río Pilcomayo Superior e Inferior.

El año hidrológico para el Río Pilcomayo ha sido establecido desde el 1 de agosto al 30 de julio. Las precipitaciones pluviales en la cuenca alta se producen entre mediados de noviembre y mediados de marzo de cada año. Durante esos cuatro meses el agua caída es prácticamente el 90 % de la que precipita durante todo el año, repartiéndose el 10 % restante en los ocho meses siguientes. Esta concentración de la lluvia en tan corto lapso, da origen a dos procesos físicos de fundamental importancia en la totalidad de la cuenca: grandes crecientes e intensa erosión/deposición fluvial. (Pool & Van Duijne, 1996)

En la Figura 3 se puede observar una esquematización de las pendientes medias a lo largo del cauce, siendo ésta del orden del 1 % aguas arriba de Villamontes y de 0,41 ‰ aguas abajo.

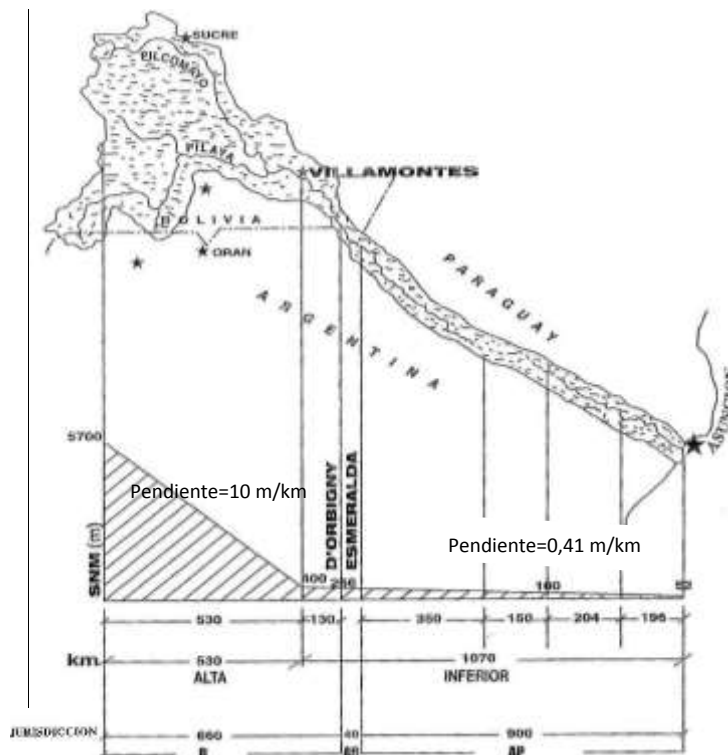


Figura 3.- Esquema de Pendientes medias, cuenca alta y cuenca baja (Lagranja, 2001).

Tabla 1.- Cotas de Localidades de la cuenca del Río Pilcomayo.

Localidad	Cota msnm
Potosí	3976
Sucre	2790
Villamontes	400
Ibibobo	340
Misión La Paz	230
Santa María	275
La Dorada	200
Salto Palmar	108

El Río Pilcomayo presenta un gran rango de caudales con estiajes desde $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación de aforo de Misión La Paz (MLP) y máximos de $6500 \text{ m}^3/\text{s}$ en épocas de crecidas en la estación de aforo de Villamontes (VM). El máximo calculado en MLP ha sido de $4750 \text{ m}^3/\text{s}$, 3300 veces mayor que el mínimo y 26 veces mayor que el modulo en esta sección, estimados en $1,47 \text{ m}^3/\text{s}$ y $180 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Estos números dan una clara idea de la gran irregularidad del río, especialmente si se los compara, por ejemplo, con los del río Paraná en Corrientes o el río Bermejo en Pozo Sarmiento. En la Tabla 2 se observa que la diferencia entre caudales máximo y mínimo es de solo 5,6 veces para el Paraná y de 136,5 para el Bermejo. Los máximos se obtuvieron a partir de curvas H-Q.

Tabla 2.- Comparación de Caudales diarios líquidos máximos, mínimos anuales y módulo de los Ríos Pilcomayo, Bermejo y Paraná.

Río	Estación	$Q_{\text{máx}}$ m^3/s	Módulo m^3/s	$Q_{\text{mín}}$ m^3/s	$Q_{\text{máx}}/Q_{\text{mín}}$	$Q_{\text{máx}}/\text{Mód}$
Pilcomayo	Villamontes	6500	266	32,88	228,10	28,19
	Misión La Paz	4750	180	1,45	3300	26,38
Bermejo	Pozo Sarmiento	3488	375	25,55	136,55	9,30
Paraná	Corrientes	60215	17189	10615	5,67	3,50

El Río Pilcomayo también presenta una gran variación en la concentración de sedimentos a lo largo del año hidrológico, la concentración es más elevada en los meses de crecida y reducida en los meses de estiaje. En aguas altas se tiene una concentración media de $C=23,6 \text{ g/l}$ y en estiaje esta es sólo de $0,011 \text{ g/l}$, como concentración máxima se ha obtenido 60 g/l (Martín Vide, Amarilla, Gamarra, & Zárate, 2007). El 95 % del transporte del sedimento ocurre en los meses de aguas altas.

En la Tabla 3 se presentan los ríos con mayor transporte de sedimentos, incluido el Pilcomayo entre los principales

Tabla 3.- Ríos con mayor transporte de sedimentos, tasa media anual (Lagranja, 2001).

Río	Sedimentos (Kg/m^3)
Yukón (Alaska)	26,0
Pilcomayo (Arg-Par)	23,1
Huanghe (Asia)	22,4
Bermejo (Argentina)	12,0
Nilo (África)	3,7
Ganges (Asia)	1,7

En la cuenca baja se producen numerosos desbordes de considerable magnitud. Los principales se denominan El Chañaral, La Gracia y Las Vertientes que desbordan por margen derecha hacia el lado argentino y La Puerta y Pozo Hondo y Torcuato Cué que desbordan hacia margen izquierda, el lado boliviano y paraguay. En la Figura 4 se presentan los desbordes mencionados.

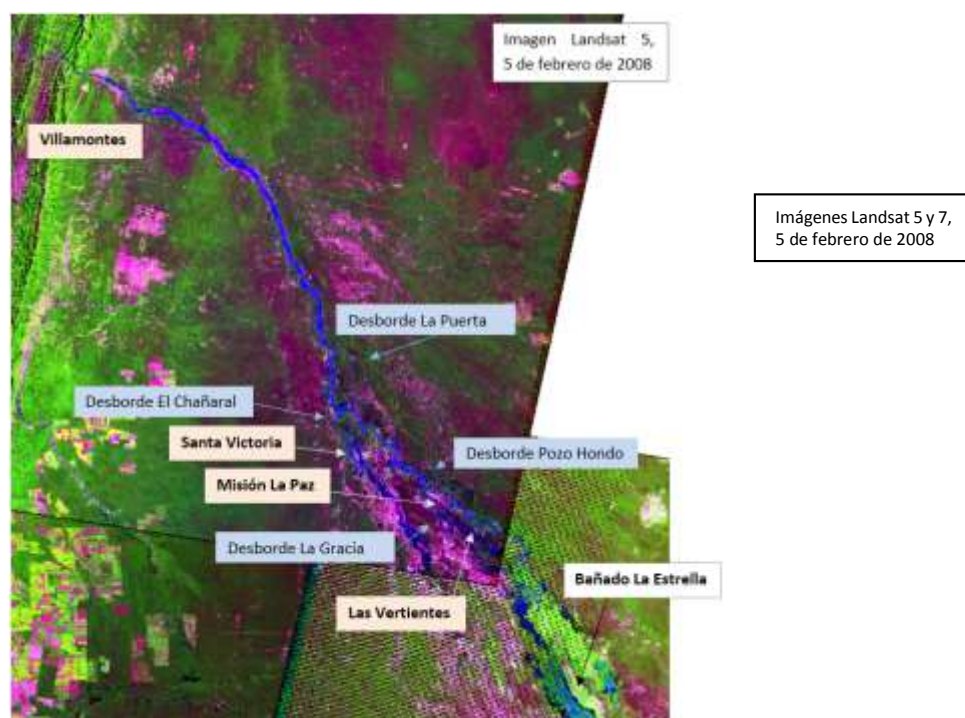


Figura 4.- Identificación de Desbordes, Localidades de Referencia y el origen del bañado La Estrella.



Figura 5.- Zona de Desborde en Misión Las Vertientes, Campaña enero 2014.

En el Río Pilcomayo las inundaciones o desbordes se dan en los bajos de las márgenes naturales, a los que se conocen como puntos críticos. Este río posee un cauce de tipo “colgado”, sus llanuras de inundación tienen menor cota que sus márgenes. Al sobrepasarse el nivel de las márgenes durante las crecidas; el agua escurre por la llanura de inundación con velocidades bajas, al retirarse el agua, ya sea porque regresa al río, sigue su camino aguas abajo o después de unas semanas se infiltra y evapora, queda depositado sobre el suelo sedimento muy fino, a este proceso se lo conoce como enlame. El enlame trae como consecuencias la elevación de la cota de llanura de inundación.

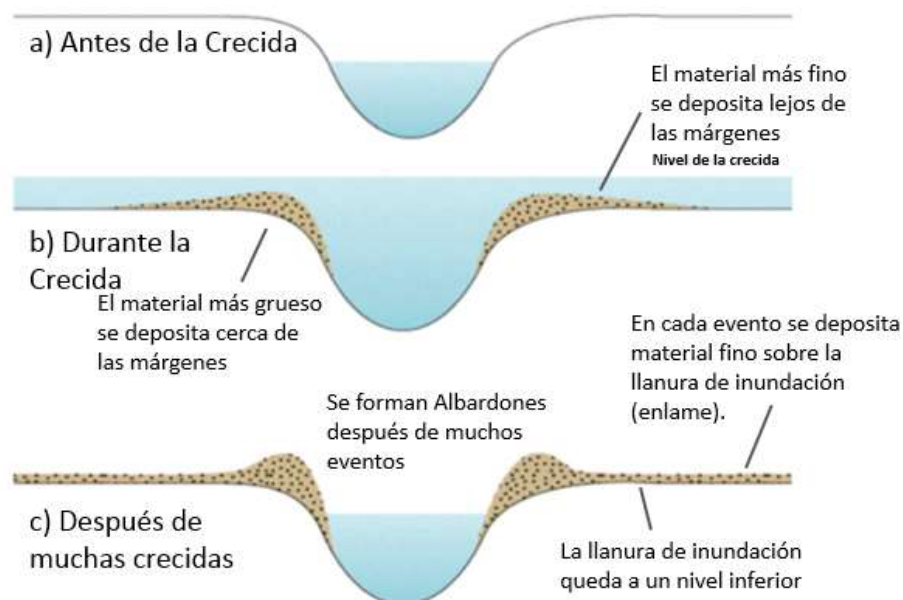


Figura 6.- Esquema de cauce “colgado” y del proceso de formación.

Las problemáticas más comunes consecuencia de los desbordes son: inundaciones con importantes pérdidas materiales, anegamiento de zonas por largos periodos de tiempo, aislamiento de poblaciones y evacuaciones regulares, pérdida de terreno porque el río

erosiona las márgenes, pérdidas de calidad de suelo por enlame o deposición de finos que perjudica el crecimiento de alimentos y el pastoreo del ganado. Por tal motivo es de interés caracterizar estos eventos, determinar el área de la mancha de inundación, su longitud, su tiempo de permanencia, velocidad de avance y de evacuación por la importancia que representa para las comunidades.

1.1. Objetivos

Como objetivo principal de esta tesis se plantea cuantificar los caudales que provienen de Bolivia hacia Argentina y Paraguay y sus distribuciones naturales por medio de desbordes, que se activan durante el paso de las crecidas. Se plantea también mejorar el conocimiento del sistema fluvial del Río Pilcomayo y aportar herramientas técnicas para un futuro tratado tri-Nacional entre Argentina, Paraguay y Bolivia en lo que se refiere a distribución de aguas.

A los fines de cumplir con el objetivo general mencionado anteriormente, se detallan los siguientes objetivos particulares:

- Determinar los hidrogramas en las secciones con estaciones de aforo de Villamontes (Bolivia) y Misión La Paz (Argentina) a partir de las lecturas de escalas en estas estaciones y aforos.
- Cuantificar el movimiento del lecho en las estaciones de aforo durante el paso de las crecidas.
- Determinar los caudales que activan los desbordes utilizando diferentes metodologías que garanticen la fiabilidad de los resultados: análisis de probabilidad de excedencia y estudio de hidrogramas de forma conjunta con imágenes satelitales.
- Análisis de la información disponible de crecidas pasadas para buscar regularidades y patrones de comparación con crecidas recientes, que permitan predecir el comportamiento de los desbordes.
- Presentar un modelo hidráulico unidimensional del tramo comprendido entre Villamontes y Misión la Paz y uno bidimensional en la zona de influencia del desborde El Chañaral.
- Validar y profundizar la metodología de análisis de crecidas propuesta en Testa Tacchino (2015) que incorpora el análisis de desbordes tendiente a la cuantificación de la distribución de aguas. En esta tesis se aplica a las crecidas del año 2013, 2014 y 2015.

1.2. Esquema de distribución de aguas

Las aguas del Río Pilcomayo escurren encauzadas desde Villamontes (Bolivia) hasta casi llegar al límite con Argentina, al norte de la localidad de D'Orbigny, donde ocurre el primer desborde hacia lado boliviano, aguas abajo aparecen los desbordes La Garrapata y El Chañaral hacia lado argentino y La Puerta hacia lado boliviano, y luego, aguas abajo, los desbordes Pozo Hondo hacia lado paraguayo y La Gracia hacia lado argentino. Todos los desbordes mencionados ocurren aguas arriba de Misión La Paz (Figura 7).

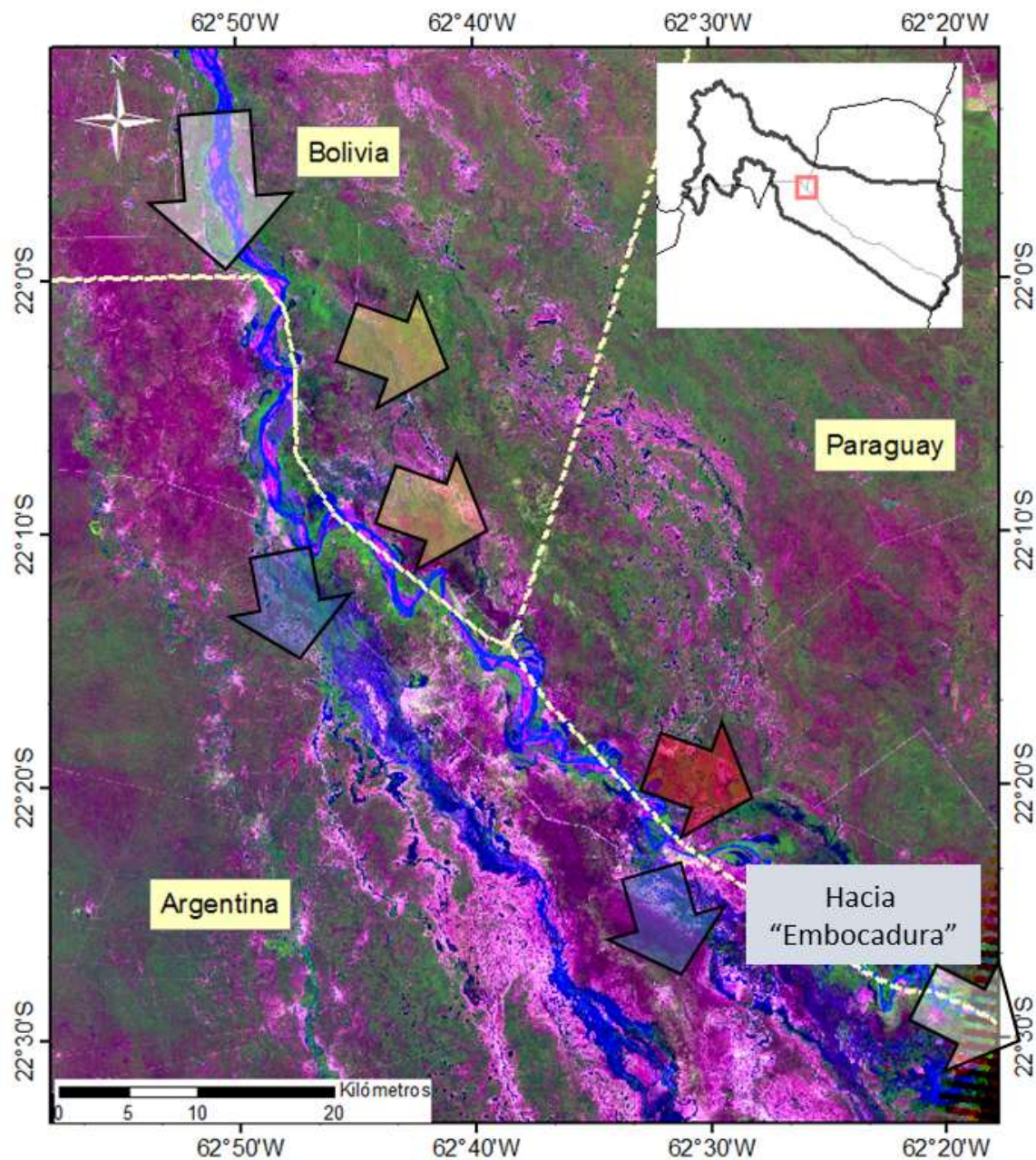


Figura 7.- Esquema de distribución de aguas desde la salida de Bolivia hasta MLP.

Aguas abajo de Misión La Paz ocurren más desbordes que no se estudian en esta tesis, como Las Vertientes hacia lado argentino, para luego llegar al sistema distribuidor "La Embocadura" (Figura 8) que divide las aguas entre Argentina y Paraguay.

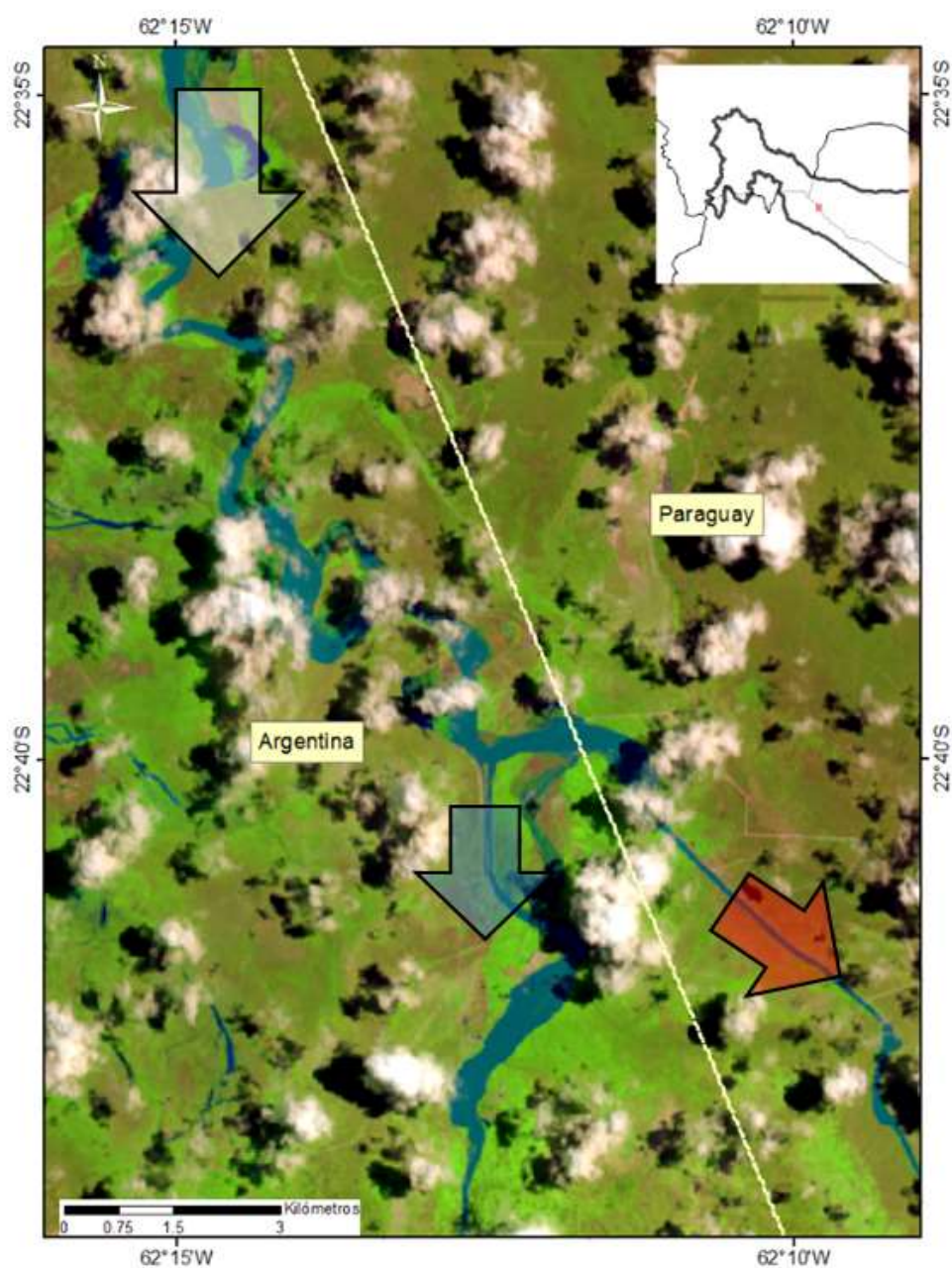


Figura 8.- Esquema de distribución de aguas en el sistema distribuidor “Embocadura”.

Todos los desbordes que ocurren son naturales y se activan de acuerdo a la magnitud de la crecida. Los desbordes no son puntos fijos, su morfología va variando de crecida en crecida, no obstante para el periodo de estudio se puede generalizar que se comportan como fijos. El sistema distribuidor “Embocadura” es de origen antrópico y requiere constante mantenimiento por parte de ambos países para evitar o subsanar colmataciones.

La legislación actual y convenios vigentes solo hacen referencia a la distribución de aguas en el sistema distribuidor “Embocadura” y no contempla el agua que se distribuye a cada país por medio de los desbordes naturales.

1.3. Metodología

1.3.1. Revisión de Antecedentes

A partir de la lectura de diversa bibliografía, se realizó un compendio en lo que se refiere a aspectos fundamentales para la comprensión del comportamiento del Río Pilcomayo, reconocido por su unicidad en el mundo. Además, se hace énfasis en la información que sirve como punto de partida para los estudios presentados en esta tesis.

1.3.2. Obtención de Hidrogramas

El Río Pilcomayo se encuentra aforado desde hace 50 años por parte de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Argentina (SSRRHH) y hace 40 años por parte del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI). Además se poseen lecturas de escala, por lo general entre cuatro y seis veces al día y cada 15 minutos a partir del año 2013, con la instalación del sistema de radar Kalesto (OTT, 2008). No obstante, la información muchas veces es incierta o presenta complejidades que ha sido necesario abordar. Entre estas dificultades se destacan: las curvas H-Q de Misión La Paz no son una función única, sino que varía para cada crecida y las curvas H-Q, tanto para Villamontes y Misión La Paz, se obtienen a partir de aforos que excluyen las crecidas lo que obliga a realizar correcciones en las series hidrométricas (Capítulos 3 y 4). El eje de esta tesis, como ya se comentó, abarca el periodo donde se concentran los mayores volúmenes de agua, es decir durante las crecidas. A partir del año 2014, se afora con molinetes y flotadores durante crecidas en VM y MLP, si bien por cuestiones de seguridad no se alcanza a aforar los picos.

Con la información disponible se ajustaron funciones que permiten obtener con cierta certeza los caudales a partir de las lecturas de escala.

1.3.3. Curvas I-D-T de caudales

Fue necesario realizar estas curvas para tener una noción clara de los periodos de retorno de los diferentes caudales durante la crecida. Esta información es de mucha utilidad, ya que permite encuadrar las crecidas en relación con su magnitud (Capítulo 4.1).

1.3.4. Determinación de caudales que activan los desbordes

1.3.4.1. Excedencia de caudales

A partir de la serie de caudales obtenidos en Villamontes y Misión La Paz se ordena la información de cada serie de acuerdo a su probabilidad de excedencia o periodo de retorno. Se grafican ambas curvas y la comparación permite observar saltos en la diferencia de caudales que implican pérdidas en el sistema, entre ellas la activación de desbordes (Capítulo 4.2).

1.3.4.2. Análisis de productos de satélite y radar.

La utilización de sensores remotos permite identificar las manchas de inundación y sus propiedades físicas como son, forma, área de cobertura y longitud. Si se posee más de una imagen para un evento, se puede estimar velocidades medias de avance, y junto a la topografía, volúmenes almacenados (Capítulo 6). Al vincular las imágenes con datos hidrológicos permite estimar los caudales de activación de desbordes. A partir de productos SRTM se acondicionaron modelos digitales de terreno para el desarrollo de los modelos hidráulicos que aquí se presentan.

1.3.4.3. Modelación numérica

En esta tesis se utilizan modelos hidráulicos unidimensionales (Capítulos 7.1) para todo el tramo comprendido entre Villamontes y Misión la Paz, y un modelo hidráulico bidimensional (Capítulo 0) para la progresiva del desborde El Chañaral.

Estas herramientas numéricas presentan fuertes limitaciones a la hora de predecir el comportamiento de este río con alta movilidad en las 3 dimensiones y alta carga de sedimentos. Sin embargo, sí nos ofrecen información cualitativa de gran importancia, una estimación del hidrograma de desbordes e incluso en el caso hidrodinámico valores de velocidad y tirantes con cierta precisión para ser utilizados posteriormente como datos de entrada en estudios a mayor escala.

1.3.5. Tareas de campo

Se realizaron tres campañas (Capítulo 5) que permitieron reconocer las zonas de desbordes, los procesos de erosión de márgenes, movilidad del lecho, sedimentación y enlame, cambios del paisaje y las defensas que muchas localidades han construido. También se realizaron aforos y se verificaron las técnicas y metodologías que se emplean, esto nos permitió sugerir modificaciones enriquecedoras para la base de datos. También se pudo observar y registrar una crecida, fundamental para comprender este río, así como ver las consecuencias de las mismas para la población que se observa en aislamiento de poblaciones, cortes de acceso y en algunos casos evacuación. En definitiva, se recorrió desde la zona de embocadura hasta aguas arriba de Villamontes, en tres oportunidades y con objetivos diferentes y complementarios que fortalecen cualquier enfoque desde la teoría o análisis de datos que se pueda aportar desde el trabajo en gabinete.

El conjunto de estas metodologías permitirán arribar a un método para el análisis de crecidas y desbordes del Río Pilcomayo (Capítulo 8), que podrá ser replicado año a año contribuyendo a la constitución de una base de datos sólida y consistente.

2. Revisión del Estado del Arte

2.1. *Breve historia de los Tratados Binacionales y Trinacionales*

La primera exploración moderna del curso chaqueño del Río Pilcomayo fue la expedición del Dr. Creveaux en el año 1876 que paró en el Chaco Paraguayo después de un ataque de los indios que mataron a todos los miembros del grupo. Dos años después, el Sr. Thouar realizó el reconocimiento completo del curso del Río Pilcomayo por demanda y con la ayuda de los gobiernos de Bolivia, Paraguay y Argentina. Esto significa que no disponemos de ningún mapa ni conocimiento del régimen del Río antes del comienzo de este siglo, sobre un periodo bastante corto, para un río que cambia muy rápidamente. Este hecho es importante para la dificultad de comprensión de esta cuenca y de sus problemas (Gilard, 1996) .



Figura 9.- Ubicación en la cuenca (Kopaliani & Georgievsky, 1993)

El Ing. Lange en 1906, recorrió el Pilcomayo desde su desembocadura hasta el paralelo 22°, haciendo uno de los relevamientos más completos hasta ese momento. Krayse y Ayala en 1908 elaboraron un informe en el cual afirmaban que por entonces aún el Estero Patiño recibía permanentemente agua del Río Pilcomayo. De allí en más Tapia, Groheber y otros comienzan a estudiar y desarrollar sus hipótesis acerca de los fenómenos que se producían en el Estero Patiño y sobre el sector del río que desemboca en el río Paraguay. Ya por esos años el Estero Patiño era una planicie anegadiza con un tirante que alcanzaba el metro, con vegetación acuática y fauna propia de pantanos. Según Volpi, en 1933, se producía el primer depósito importante entre Horqueta y Santa Ana. Volpi a través de sus observaciones concluyó que existía un gran delta sobre el río Paraguay integrado por varios tributarios, hacia el norte en territorio paraguayo, conformado por el Confuso, el Aguaray Guazú, el Negro y el Verde y en nuestro país primeramente alimentaba una zona de humedales que luego drenaba hacia los riachos Salado, Monte Lindo, Pilagá y Arroyo Guanacaré.

A partir de los sucesos ocurridos en mayo de 1810 en Buenos Aires la intendencia del Paraguay se aisló del resto del Virreinato del río de la Plata y declaró su independencia en 1842. Este acto no fue aceptado por Juan Manuel de Rosas, que entonces era gobernador de la Provincia de Buenos Aires y encargado de las relaciones exteriores de la Confederación Argentina, por lo que la emancipación sólo fue reconocida en 1852 por los vencedores en Caseros.

Tras la Guerra de la Triple alianza, llamada por Alberdi de la “Triple Infamia”, que concluyó con la derrota del Paraguay en 1870, se acordó que las cuestiones de límite se abordarían cuando este se encontrara regido por un gobierno permanente.

Recién el 3 de febrero de 1876 se firmó la paz entre Argentina y Paraguay. Se estableció que el límite entre los dos países hermanos sería por el este y por el sur el río Paraná; por el Oeste el canal principal del río Paraguay. La soberanía sobre Villa Occidental y el territorio adyacente entre los ríos Verde y Pilcomayo sería sometida al arbitraje del presidente de los Estados Unidos, Rutherford Hayes, quién en 1878 dictó su laudo y sin exponer fundamento alguno cedió todo el territorio en disputa al Paraguay. El sector del Chaco Boreal entre Bahía Negra y el río Verde fue cedido definitivamente por la Argentina al Paraguay.

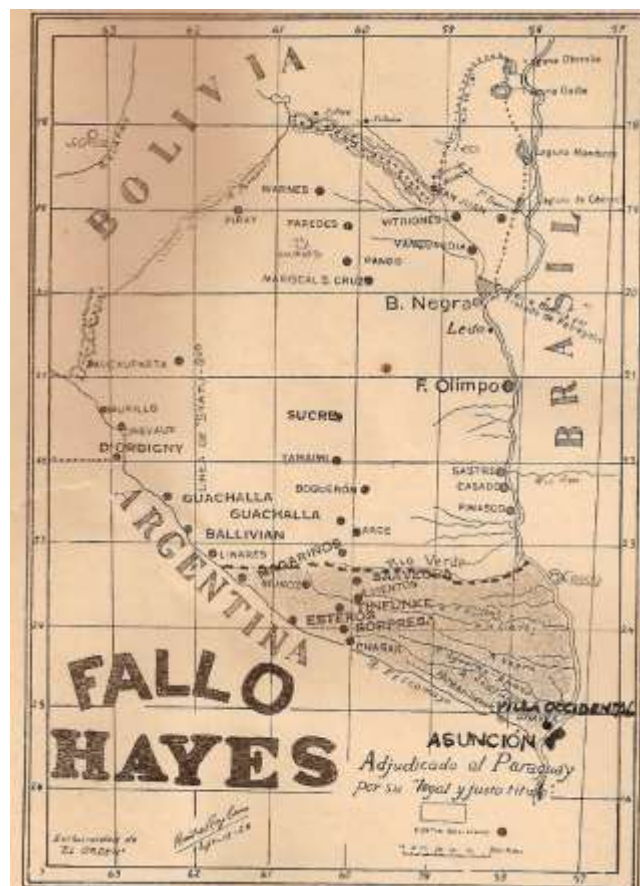


Figura 10.- Laudo Hayes

El árbitro estadounidense no se expidió sobre el límite occidental del territorio. Por ello sólo se fijó el punto tripartito entre Bolivia, Paraguay y Argentina, denominado Esmeralda en 1941, tras la conclusión de la guerra paraguayo-boliviana.

El tratado Irigoyen – Machain, firmado en Buenos Aires el 3 de febrero de 1876 y el fallo arbitral de Hayes de 1878 establecieron que el brazo principal del Río Pilcomayo sería el portador del límite internacional entre el Paraguay y la Argentina. Cuando se procuró determinar ese brazo principal en el terreno se advirtió la inexistencia de un cauce definido en la zona correspondiente a los esteros Patiño. En 1905 y 1907 se firmaron protocolos que disponían la realización de estudios en la zona de los esteros. En 1939 se firmó el acuerdo Cantilo-Arbó, que dividió al Río Pilcomayo en tres sectores y definió el método para determinar el límite. Este tratado previó la realización de obras con el fin de asegurar la estabilidad de la línea limítrofe y la utilización de los caudales del río, pero no se llevaron a cabo (Rey Balmaceda, 1979).

Posteriormente en 1945 se realiza la demarcación de hitos. Coincidentemente en este año se produce un nuevo retroceso del punto de quiebre de la pendiente ("Knickpoint" según la literatura anglosajona) que deja sin aportes líquidos al Estero Patiño lo que contribuye a su posterior desecamiento.

Después de la crecida de 1969-70 se observa nuevamente que 25 kilómetros del río se habían colmatado. Durante la década de los 70' se realizaron estudios en toda la cuenca promovidos por Naciones Unidas, el Banco Interamericano de Desarrollo y otros organismos internacionales, con el fin de programar el aprovechamiento de los recursos hídricos de la cuenca y dar solución a los problemas de retroceso del cauce natural. Desde Pedro P. Peña hacia aguas abajo los sitios donde el río sale de su cauce en épocas de crecida son numerosos. En junio de 1976, Puerto Irigoyen queda totalmente colmatado.

En definitiva, entre 1947-1976 los relevamientos realizados indicaron que el punto de quiebre o knickpoint había retrocedido 150 km. Ya en los 90' después de muchas confrontaciones con la República del Paraguay por la distribución de caudales se celebró un nuevo acuerdo. En esta ocasión se decide realizar un sistema de canalización "Proyecto Pantalón" que reparta los caudales de modo igualitario a cada país. Es así que en 1991 se construyen los canales derivadores.

El punto de taponamiento en 1995 se ubicaba a los 62°11' O, 22°40' S, 65 km aguas abajo del límite Trinacional. En 1997 se llevaban contabilizados más de 300 km del cauce natural del Río Pilcomayo colmatados de sedimentos.

La gran cantidad de sedimentos producidos en el altiplano, que luego son depositados en la planicie chaqueña, además de la alta variabilidad de los caudales líquidos producto del régimen de precipitaciones, se mencionan como factores claves que promueven los cambios morfológicos que traen aparejados desbordes y anegamientos (Amarilla M. , 2005).

A pesar de las canalizaciones mencionadas, realizadas en los '90, que fueron diseñadas para la distribución igualitaria de caudales entre Argentina y Paraguay, este no ha sido el resultado observado.

Gran parte del Río Pilcomayo fluye entre el límite de Argentina y Paraguay, lo que ha llevado a estos países a suscribir acuerdos binacionales para su gestión, que concluye en

la creación de una Comisión Binacional. En el año 1996 se aprueba la ley 24.697 que tiene origen en el Memorándum de Entendimiento suscrito por los países Argentina y Paraguay el 14 de septiembre de 1993, donde se decide constituir la Comisión Binacional Administradora de la Cuenca Inferior del Río Pilcomayo y que culminará con la creación de la comisión Binacional en el año 1998. En dichos acuerdos se estipula la coordinación de acciones para lograr el uso equitativo del recurso, es decir, que cada país pueda aprovechar la mitad del caudal de agua. La materialización en el cauce de las acciones tendientes a cumplir con estos convenios se encuentra ubicada a unos 25 km aguas abajo de la entrada del río a la provincia argentina de Formosa a los 22.661621° de Latitud Sur, 62.199912 ° de Longitud Oeste en una zona llamada Embocadura.

Este sistema partididor de caudales, está compuesto principalmente por un canal que toma el agua del río a territorio paraguayo, mientras que el agua que continúa por el río, por otras obras de canalización entra en territorio argentino (Figura 27).

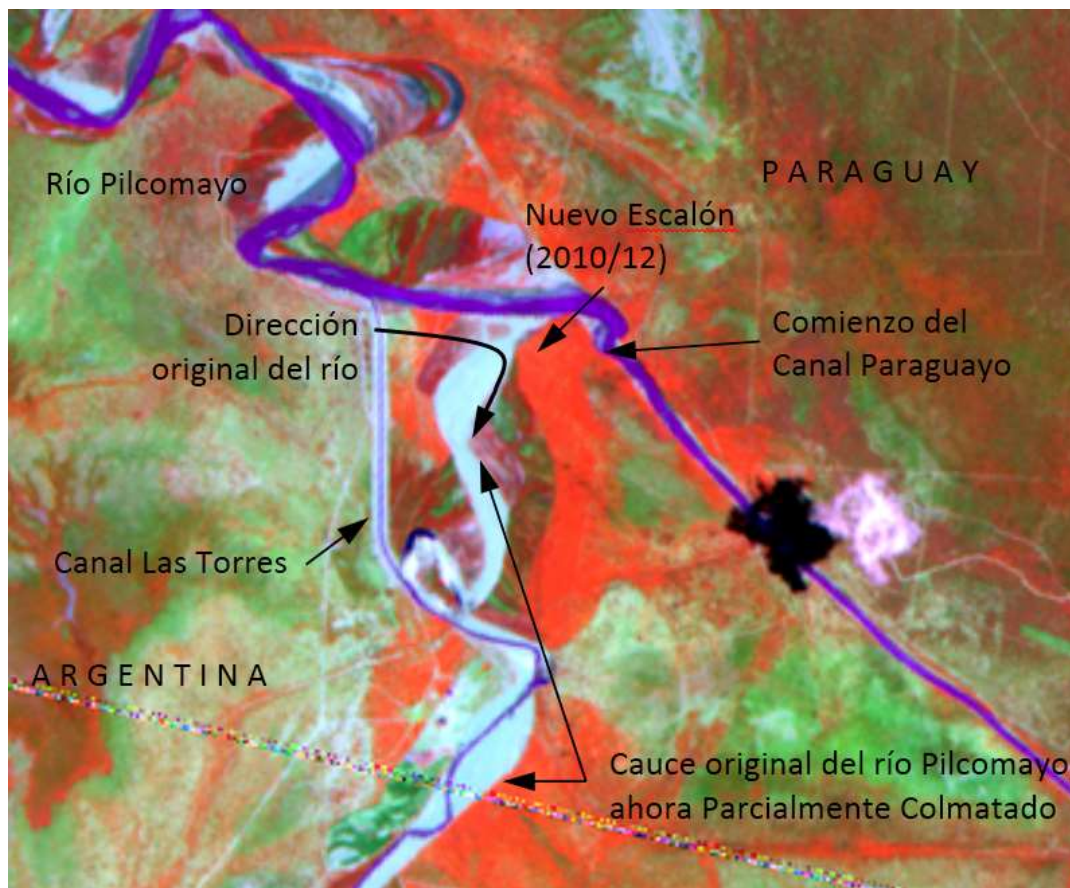


Figura 11.- Vista de la zona de Embocadura. Satélite IRS, fecha 14/11/12 (Baldissoni, 2013).

A pesar de los esfuerzos de mantenimiento en ambos cauces (canal paraguayo y Río Pilcomayo), la inestabilidad geomorfológica inherente al sistema y las condiciones hidráulicas operantes en el mismo han ido favoreciendo una mayor entrada de caudales a territorio paraguayo

En el año 1999 Paraguay construye su nueva toma, situada en la zona conocida actualmente como “Embocadura” (en el período de aguas bajas) este canal entra en funcionamiento para la nueva crecida, del año 2000. Los ingresos de caudales a través de

esta obra en el período de aguas altas se compatibilizan con su capacidad de conducción, totalmente despreciable para caudales de crecidas del río.

Conforme la ubicación de la toma, este canal recibe gran parte del material vegetal flotante, el cual obtura el tramo inicial del mismo y sedimenta buena parte del resto del canal, lo que provoca que, para el período de aguas bajas del río, no reciba agua. En este período de aguas bajas se construye una nueva toma a 200 m de la anterior, conectando con la traza de canal existente.

En el 2001, las condiciones de ingreso de aguas a territorio paraguayo se corresponden con idéntico comentario al anterior para el período de aguas altas, siendo nulo para aguas bajas. Los problemas de sedimentación en el canal paraguayo son una constante. En los años 2002, 2003, 2004 y 2005, se repiten las exiguas condiciones de ingreso hacia Paraguay, optando por proceder al cierre de la boca del canal, de tal manera de facilitar los trabajos de limpieza de sedimentos durante todo el año, con lo cual durante el 2006 no se producen ingresos de caudales tanto en períodos de aguas altas ni bajas.

En los años 2007 y 2008, ya con mejor capacidad de conducción del canal paraguayo se mejoran los ingresos de caudales, pero siguen siendo exiguos en comparación a los caudales del río. En el año 2009, para caudales bajos y ante obras de espigones en la toma paraguaya se producen los cambios en las distribuciones de caudales entre ambos países, asociado también al gran volumen de ingresos de sedimentos hacia territorio argentino.

A partir de julio de 2010 la entrada de agua a territorio argentino por el río comenzó a producirse de manera intermitente, ocurriendo sólo en temporadas de aguas medias y altas. Las altas tasas de transporte de sedimentos y material vegetal flotante durante las crecidas generaron una tendencia a la sedimentación del tramo de cauce del río aguas abajo de la embocadura del canal paraguayo.

En 2011 la interrupción se produce a inicios del mes de mayo. En 2012 las interrupciones de los ingresos ya se produjeron en enero, para repetirse finalmente en abril. En mayo de 2012 el fondo del cauce quedó de dos a tres metros por encima del cauce anterior del río, generando un “escalón” por el cual los caudales bajos y medios no pueden pasar hacia territorio argentino (Zambón, 2012). Con caudales del orden de 500 m³/s, la derivación era total hacia Paraguay y se estima que en volumen anual sólo un 14 % entró a la Argentina (Baldissoni, 2013). Ese año Argentina construye el Canal Las Torres con el fin de recuperar los caudales hacia el lado argentino, aumentando a 18 % el volumen anual que entró a la Argentina. En el año 2013 se amplía el canal Las Torres.

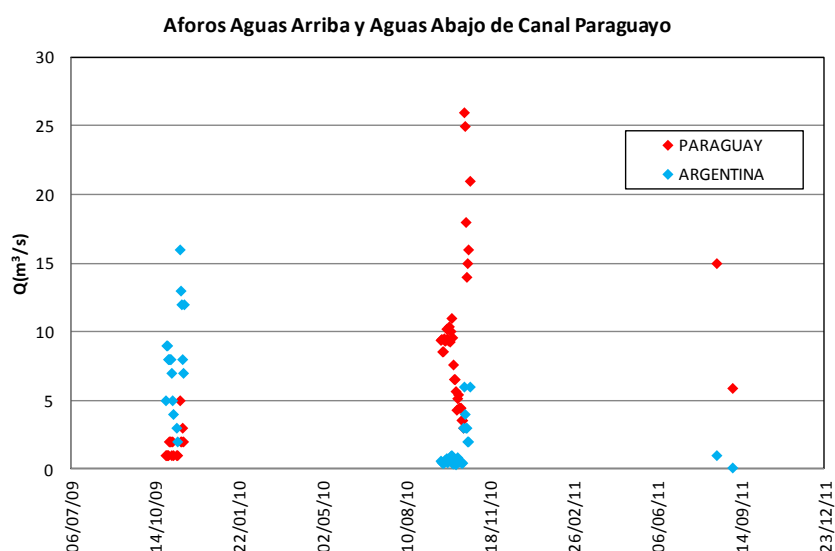


Figura 12.- Erogación de caudales hacia Argentina y Paraguay entre los años 2009 y 2011 (Baldissoni, 2013).

Después de las crecidas de 2013-2014 se tapona completamente el Canal Paraguayo, se realizan actividades de dragado, recuperando una parte del ingreso del agua a Paraguay y en el año 2016 no ingresó agua al canal paraguayo, por lo que Paraguay se decide la construcción de un nuevo canal, que en noviembre de 2016 recibe la autorización de cancillería argentina para atravesar 1000 m de territorio argentino, por medio de un canal de interconexión, para poder unir el nuevo canal paraguayo y el cauce del Río Pilcomayo.

Continuas negociaciones entre los países involucrados, Argentina, Bolivia y Paraguay, tratan de arribar a una solución definitiva a fin de lograr la repartición equitativa de caudales y solucionar el problema del retroceso del cauce.

2.2. Características Climáticas

El Río Pilcomayo nace y forma la red fluvial de su cuenca activa casi totalmente en la república de Bolivia. En esta región de la cuenca alta se produce casi la totalidad de las lluvias que forman la parte más significativa de los caudales de su curso principal. No existen caudales por deshielo en este río (Lagranja, 2001).

Las características climáticas de la cuenca del Río Pilcomayo se encuentran dominadas por los efectos topográficos de la Cordillera de los Andes, que limita los efectos del Pacífico y modifica la circulación general de los vientos tropicales y subtropicales en altura.

El año hidrológico para el Río Pilcomayo ha sido establecido desde el 1 de septiembre al 31 de agosto. Las precipitaciones pluviales en la cuenca alta se producen entre mediados de noviembre y mediados de marzo de cada año. Durante esos cuatro meses el agua caída es prácticamente el 90 % de la que precipita durante todo el año, repartándose el 10 % restante en los ocho meses siguientes. Esta concentración de la lluvia en tan corto lapso, da origen a dos procesos físicos de fundamental importancia en la totalidad de la cuenca: grandes crecientes e intensa erosión/deposición fluvial. (Pool & Van Duijne, 1996)

Las precipitaciones medias anuales para el mes de enero varían entre 100 mm y 170 mm. Los valores más bajos se registran entre Misión La Paz y la zona dónde ya no existe el cauce del Río Pilcomayo (aguas abajo del bañado la Estrella). En julio la precipitación

media mensual es muy baja, en la cuenca alta no se superan los 5 mm y aguas abajo del Bañado La Estrella se encuentran valores entre 15 mm y 45 mm. Si observamos la precipitación acumulada anual hay un gradiente positivo de Oeste a Este, con valores desde 250 mm a 1400 mm anuales.

2.3. Cono aluvial

Los frecuentes cambios laterales del cauce y la gran disponibilidad de sedimentos sueltos en la cuenca alta han generado el abanico aluvial más grande de América del Sur en el Cuaternario, aún activo. Abarca un área de Bolivia, la parte Noreste del sector Argentino de la provincia de Formosa y gran parte del Chaco Paraguayo. Este abanico aluvial tiene un área de 210.000 km² caracterizada por una gran cantidad de cauces abandonados con una típica forma triangular. Su ápice se encuentra en el flanco oriental de las sierras subandinas en Bolivia, próximo a la localidad de Villamontes; la zona distal abarca un ancho de 700 km en Argentina y Paraguay. Los cauces abandonados muestran un relleno sedimentario de arena fina limosa con un relieve interno del orden de 1 m, sin arcillas ni sedimentos gruesos. La Figura 13 muestra las principales características geológicas del abanico aluvial del Río Pilcomayo.

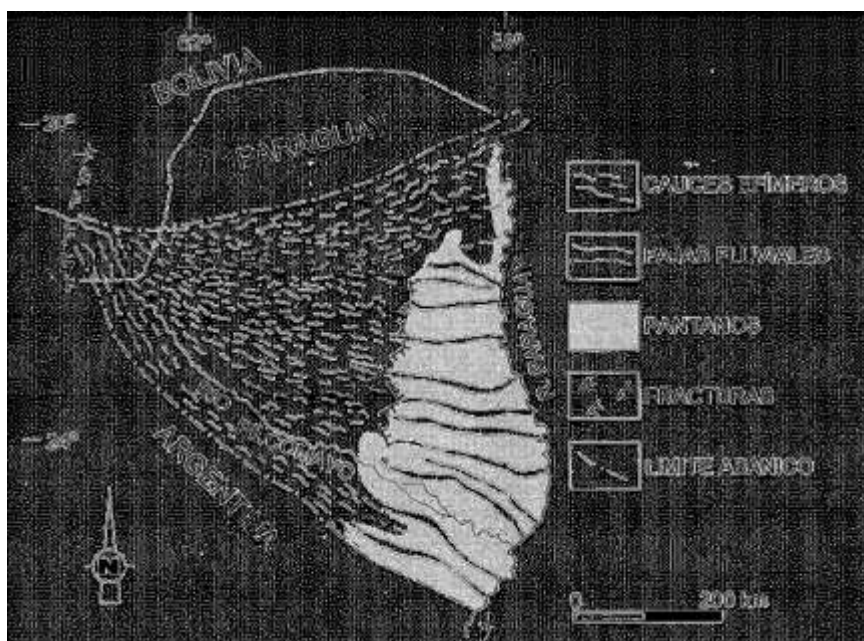


Figura 13.- Características Principales del abanico aluvial del Pilcomayo (Iriondo, Colombo, & Kröhling, 2000).

Algunos de los cauces abandonados transportan caudales de desborde considerables en la estación húmeda, cuyos sedimentos van relleniéndolos. Durante los últimos siglos, el Río Pilcomayo desembocó en una depresión de origen tectónico con unos 15.000 km² de extensión desarrollada en la frontera argentino-paraguaya, situada a unos 250 km de distancia del río Paraguay y denominada "Estero Patiño". El mecanismo de acumulación sedimentaria en el Estero Patiño consistía en la generación de diques compuestos por fragmentos vegetales (ramas y hojarasca) durante las crecidas. Esos diques actuaban como eficaces trampas para los sedimentos que se acumulaban en esas áreas, generando un tapón importante y por tanto determinando la migración del cauce funcional (Cordini, 1947). En 1980 el Estero Patiño acabó por rellenarse completamente y dejó de ser funcional como trampa de sedimentos. Así se produjo una colmatación progresiva del

segmento inferior del cauce activo con arenas finas y limos de manera que este se fue acortando aguas arriba hacia las cabeceras. El Río Pilcomayo empezó un proceso de avulsión generalizada. Este proceso condiciona el retroceso aguas arriba del punto de desbordamiento en crecientes sucesivas (Iriondo, Colombo, & Kröhling, 2000).

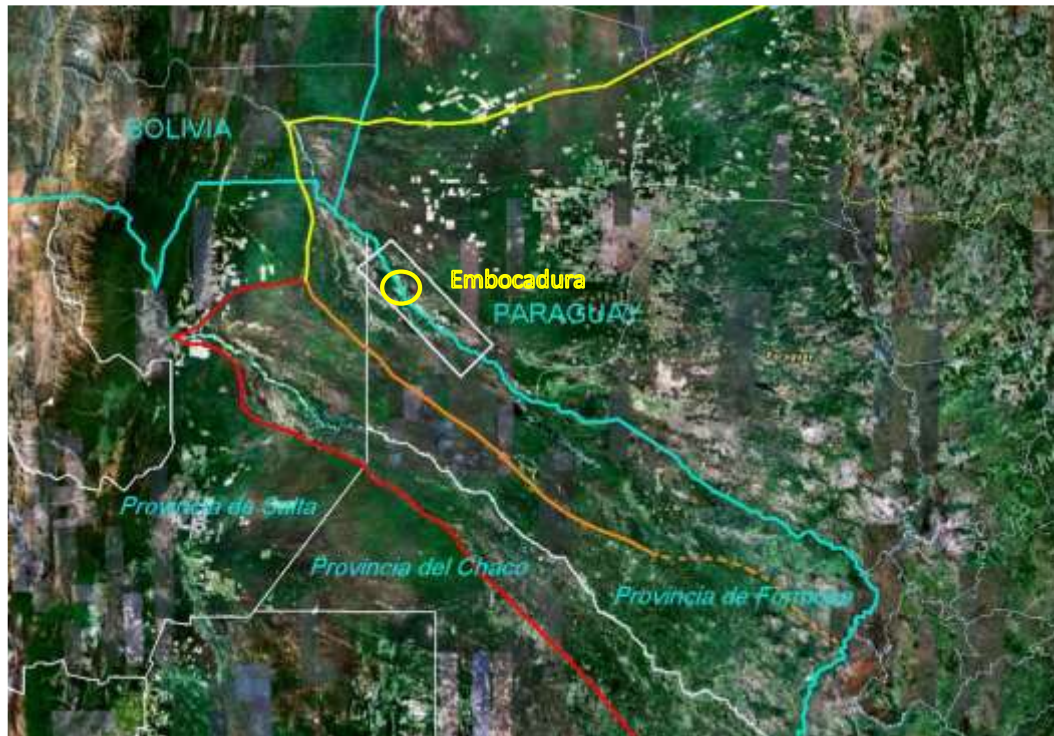


Figura 14.- Ubicación de la zona de Embocadura dentro del abanico fluvial (Halcrow, 2010).

El ritmo de retroceso ha sido muy elevado rondando los 10 km por año. Este retroceso se ha detenido desde la implementación de obras de distribución de caudales, como la obra *El Pantalón* construido en 1991 o el *Sistema Embocadura* (Figura 14) a partir de la construcción del actual *Canal Paraguayo* en 1999. La Figura 15 esquematiza los retrocesos del cauce del Río Pilcomayo, según Halcrow (2010).

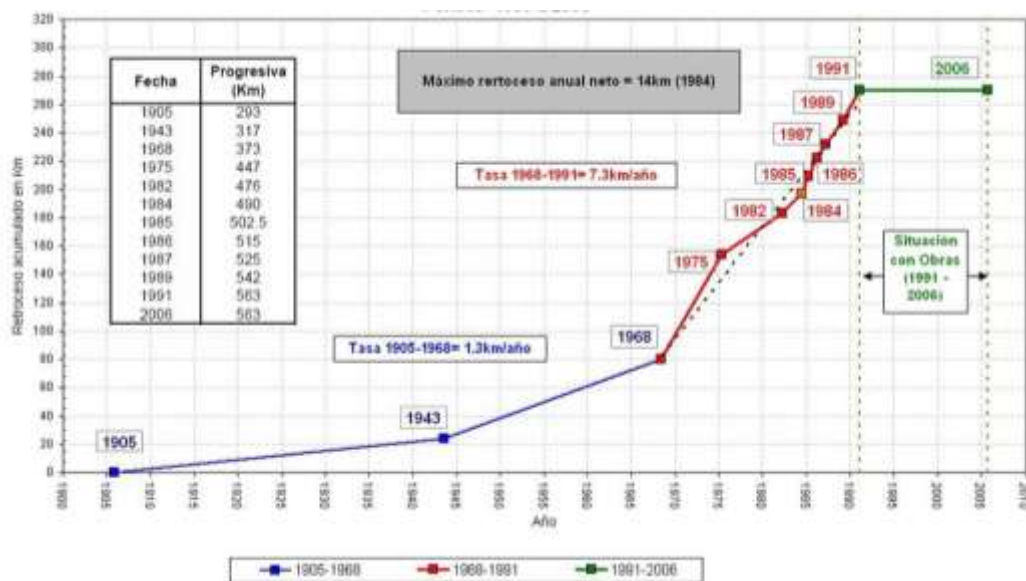


Figura 15.-Retroceso del Río Pilcomayo entre 1905 y 2006, (Halcrow, 2010).

Kopaliani y Georgievsky (1993) presentan otros valores para el retroceso del cauce, que se presentan en la Figura 16 y se comparan con los dados por Halcrow (2010) en la Figura 17. En su trabajo aseguran que, consecuencia del funcionamiento conjunto de los canales experimentales argentino y paraguayo, ubicados a 150 km aguas abajo de los actuales, en el período entre 1977 y 1983 se detuvo el avance del frente del cauce seco.

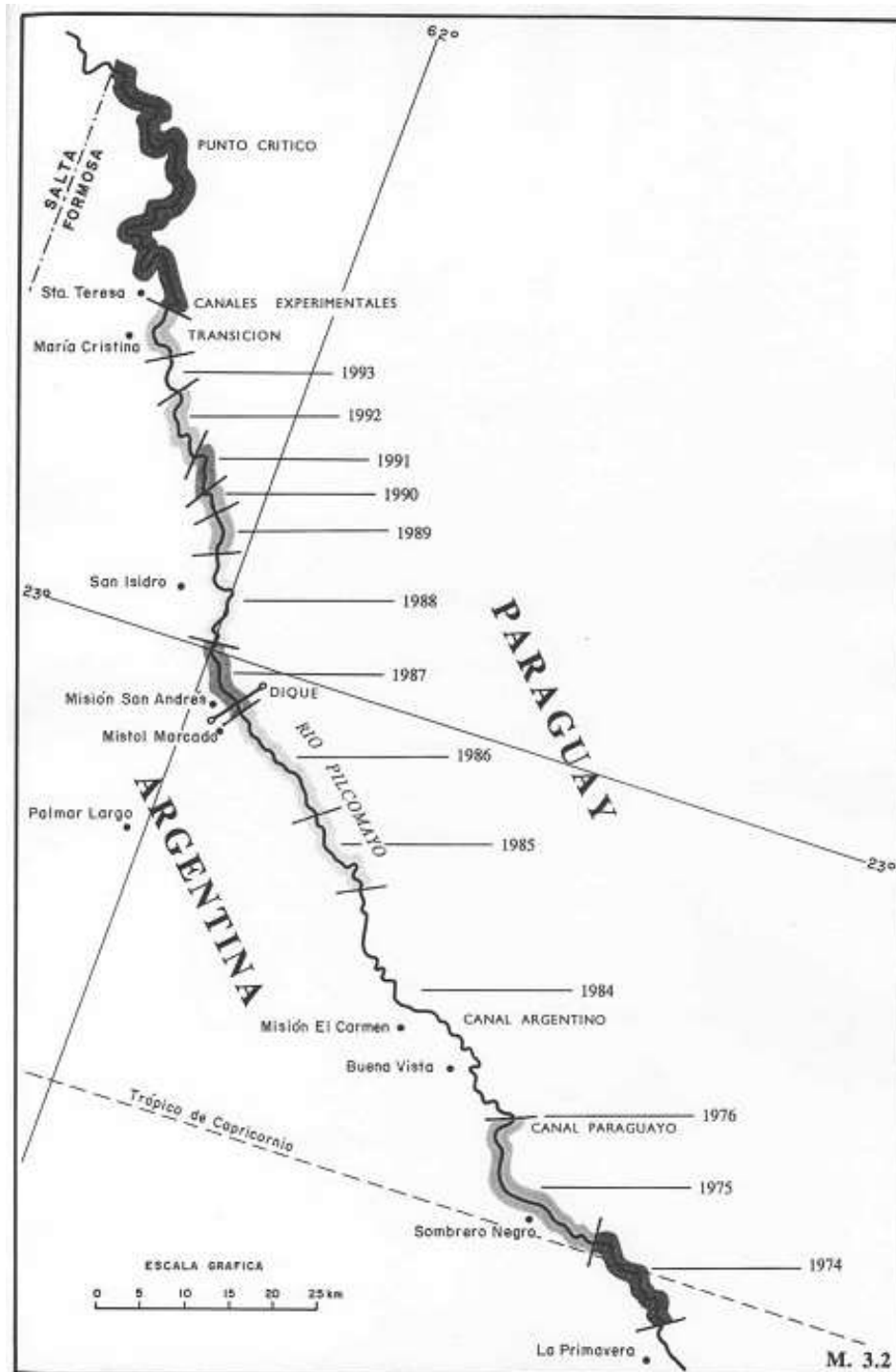


Figura 16.- Mapa del Retroceso del Cauce del Río Pilcomayo, 1974- 1993 (Kopaliani & Georgievsky, 1993).

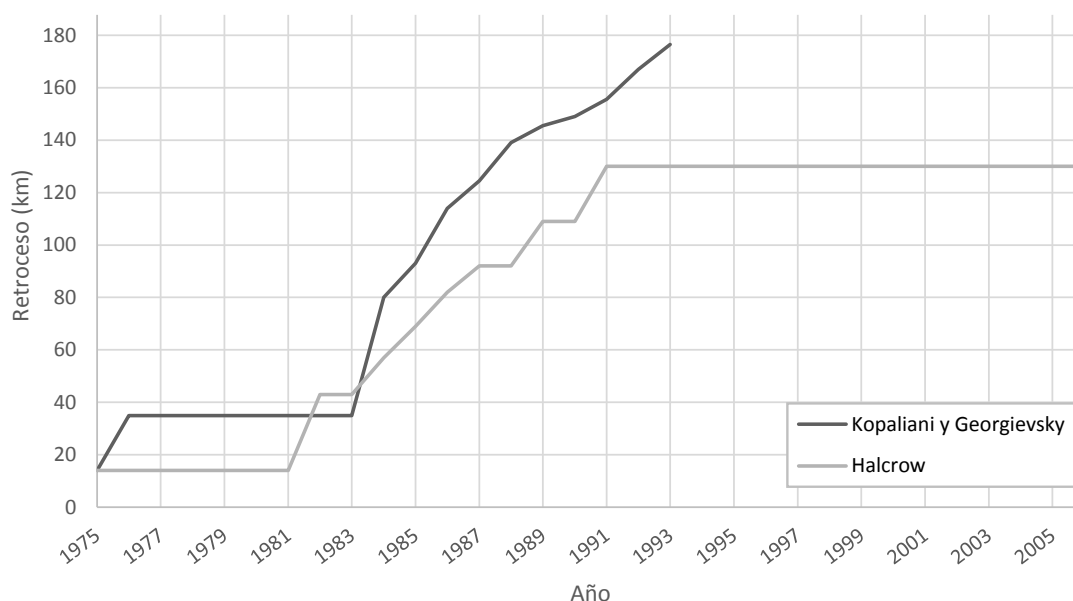


Figura 17.- Retroceso del Río Pilcomayo desde 1975 (Kopaliani & Georgievsky, 1993) (Halcrow, 2010).

2.4. Morfodinámica

El río puede ser considerado como estable desde su origen hasta alrededor de Villamontes debido a que los sedimentos son gruesos e incluso hasta Ibibobo, más aguas abajo, a pesar de encontrarse sedimentos arenosos más finos. Aguas abajo de Ibibobo hasta Santa María (Fortín D'Orbigny), en una extensión aproximada de 60 km, el lecho es trenzado y mucho más ancho que en los tramos aguas arriba. Durante las crecidas, es una zona de desborde en la que podría iniciarse un desvío total o parcial del Río Pilcomayo y por consiguiente es una zona crítica. Desde Santa María aparecen meandros, pero el río es siempre bien marcado hasta la estancia La Dorada donde el lecho va desapareciendo tapado con la masa de sedimentos que vienen de aguas arriba. Aguas abajo de La Dorada se presenta una zona de expansión de las aguas durante las crecidas con deposición de sedimentos finos y formación de un «delta interior» con lechos secundarios muy inestables. Esta zona se prolonga hasta Salto Palmar donde en su parte de arriba se llama «Estero Patiño». La Dorada está cerca de la zona donde, al inicio del siglo XX, serían disociados los Ríos Pilcomayo y Montelindo.

No parece que haya existido en el pasado histórico reciente una solución de continuidad del río a ambas partes del Salto Palmar. De hecho, la zona aguas abajo que tiene una longitud aproximada de 240 km hasta el Río Paraguay era abastecida, por una parte, de una manera difusa desde el Estero Patiño, Paraguay, (era también la fuente de abastecimiento de los Ríos Confuso, Negro, Aguaray, Guazú, etc.) y por otra parte, desde su propio impluvio (Jack Klzobzi, Ramette, & Roquero, 1997). En el año 1964 el río Pilcomayo comienza a desembocar en el Bañado la Estrella, en Argentina, y se empieza a secar el Estero Patiño.

El bañado la Estrella es un humedal formado en una faja antigua del mega-abanico aluvial del Río Pilcomayo que ahora está transformada en un pantano de 250 Km de largo y de 7 a 12 Km de ancho; en toda esa área la profundidad oscila solamente entre 20 y 80 centímetros (Iriondo M. H., 2010).

Tabla 4.- Aportes de Caudales sólidos, líquidos y tasa de erosión (Jack Klzobzi, Ramette, & Roquero, 1997)

ESTACIONES	SUPERFICIE (km ²)	APORTE LIQUIDO 10 ⁶ m ³ /a	APORTE SÓLIDO 10 ⁶ tn/a	CONCEN-TRACIÓN kg/m ³	TASA DE EROSIÓN tn/km ² /a
Fortín Pilcomayo	100.000	4.960	69	14	690
La Paz	96.000	5.330	98,5	18,5	1.030
Villamontes	82.000	5.330*	100*	19*	1.200*
Viña Quemada	13.200	1.720	35	20,5	2.650
Talula	6.400	?	14,5	?	2.300

* aproximación

Se compararon imágenes satelitales del periodo 1999-2014 y se determinaron los tipos de cauces que se muestran en la Figura 18, lo concluido se corresponde con lo que presenta Cafaro (2010).

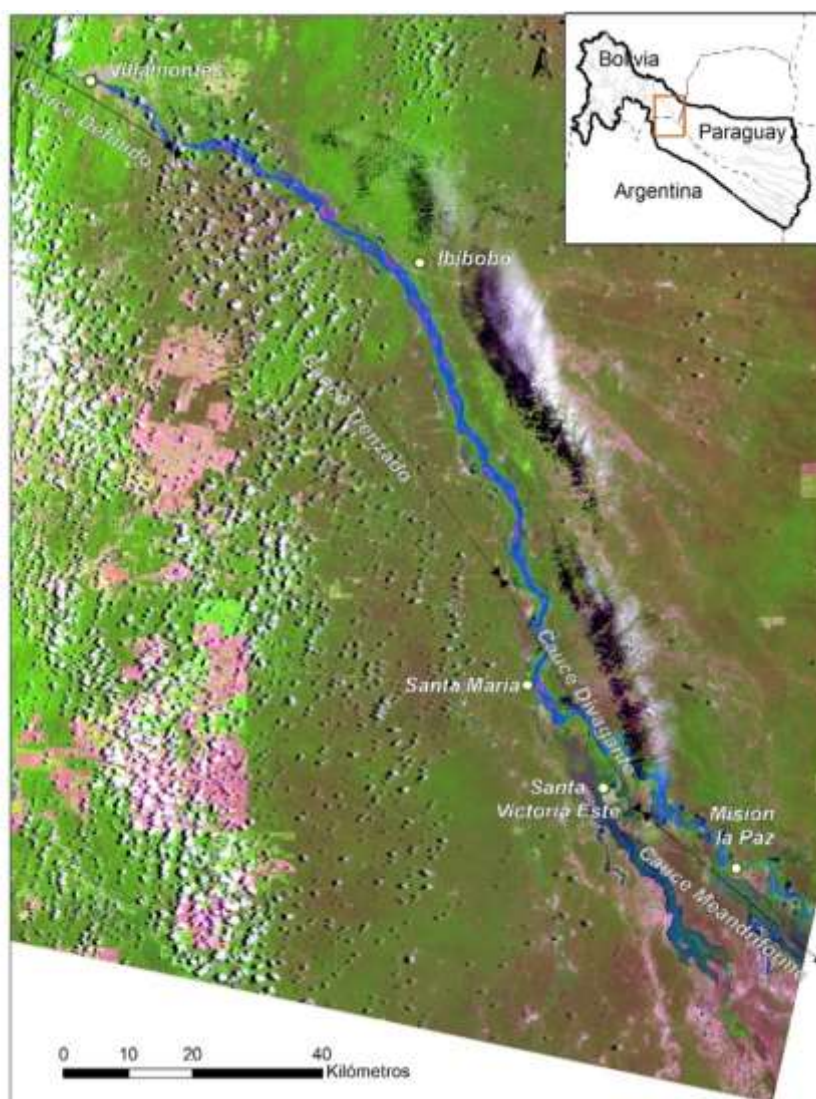


Figura 18.- Tipos de cauce en el tramo de Villamontes a Misión La Paz. Imagen Landsat 25/01/2014.

Analizando el tipo de erraticidad tanto de la planicie de inundación como del valle del río, Kopaliani y Georgievsky (1993) deducen que son asimilables a tipos de procesos fluviales comunes a los valles montañosos amplios o a las zonas de transición entre las zonas

montañosas, zonas precordilleranas y la llanura. En el fondo de los valles de los ríos se identifican tres elementos morfológicos y funcionales característicos del relieve: planicie de inundación, cauce de creciente y cauce de bajante. Una propiedad característica del valle de inundación lo constituye la presencia de vegetación cuya estabilidad está condicionada por la estabilidad del sustrato (suelo) que cubre el valle, la cual depende del régimen de escurrimiento del agua y de la distribución del flujo en el cauce de creciente. El tramo entre Villamontes y la frontera con Argentina, puede ser asociado al de salidas de montaña a la llanura, mediante un amplio valle, con la particularidad de que el cauce en la estación de aforos Misión La Paz carece prácticamente de valle de inundación, situación atípica en el Río Pilcomayo.

2.4.1. Características del lecho y márgenes

El río tiene en su curso meandriforme un lecho muy inestable, compuesto de arena fina. El río está bordeado en el tramo de desbordes de orillas sobrealzados (albardones) compuestas de arena muy fina y limo. En las llanuras de inundación se deposita limo y arcilla. El cauce colmatado dentro y a nivel de sus albardones asoma entonces por encima de los aledaños, que está por encima del nivel del terreno natural adyacente. (Pool & Van Duijne, 1996)

2.4.2. Características del Cauce

Se ha comentado que el Río Pilcomayo tiene un cauce de tipo “colgado”, es decir su llanura de inundación tiene cota inferior a las de sus márgenes. Esta característica es una de las condiciones necesarias para que haya riesgo de avulsión.

A partir de un DEM de SRTM se han extraído dos perfiles topográficos con el objetivo de observar esta característica.

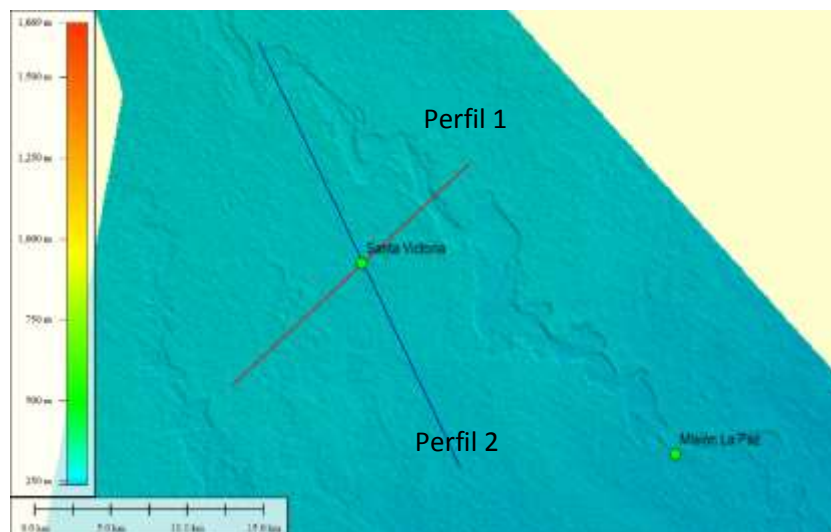


Figura 19.- Imagen SRTM de zonas próximas a Santa Victoria. Se identifican dos perfiles Transversales.
Fuente: Elaboración Propia

El Perfil 1 tiene dirección Noroeste-Sureste y pasa por la localidad de Santa Victoria, se observa en la Figura 20 que las márgenes del río están por encima de la llanura de inundación.

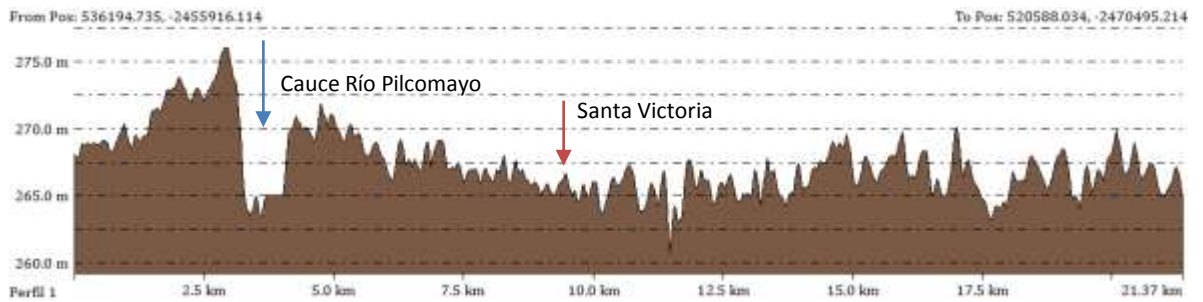


Figura 20.- Perfil 1 (Noreste – Sudoeste). Fuente: Elaboración Propia

El Perfil 2 con dirección Noroeste-Sureste pasa por el cauce del río en las cercanías del desborde El Chañaral y en la dirección de dicho desborde, pasando también por la localidad de Santa Victoria, se puede observar en la Figura 21 la pendiente en bajante hacia la llanura de inundación, con las márgenes del río nuevamente por encima de la llanura adyacente.

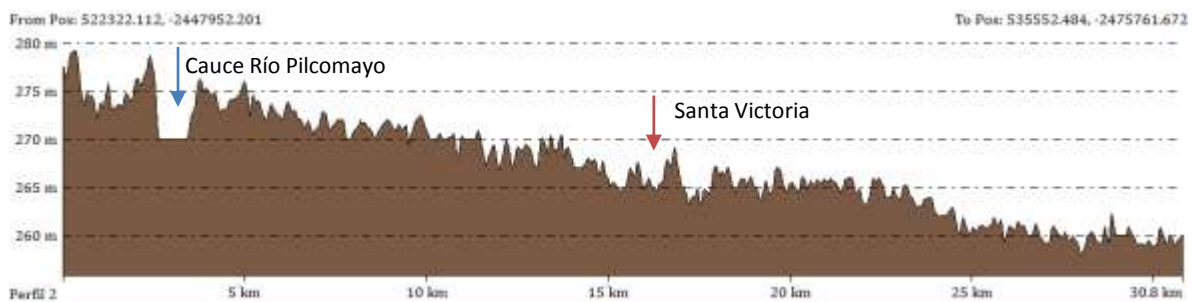


Figura 21.- Perfil 2 (Norte – Sur). Fuente: Elaboración Propia

2.4.3. Puntos críticos

Se distinguen dos sistemas de delta correspondientes a diferentes épocas geológicas. El primer delta (superior) se extiende desde Ibibobo en Bolivia hasta Santa María en la Argentina, casi en el límite con Bolivia. El segundo delta (inferior) a su vez comienza en la zona de Santa María, extendiéndose hasta la desembocadura en el río Paraguay, constituyendo la continuación del primero.

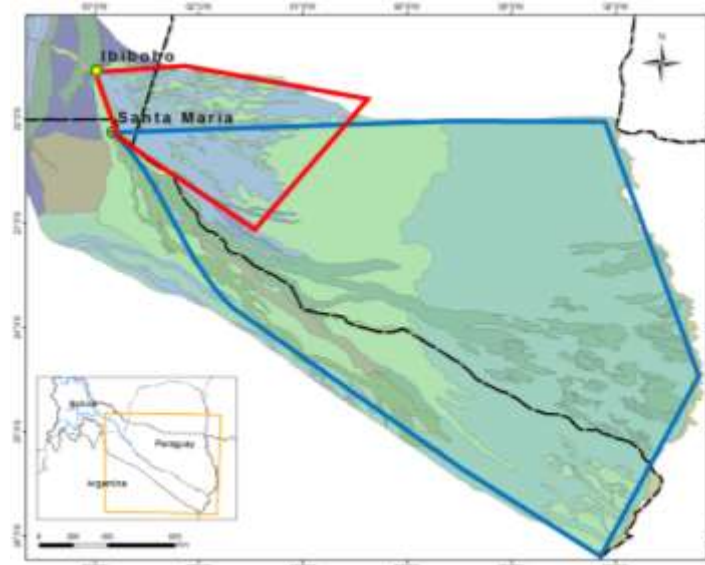


Figura 22.- Esquema de deltas superior (rojo) e inferior (azul) sobre mapa de unidades geológicas, a partir de Halcrow y Serman (2007).

También se han identificado dos puntos singulares del cauce, ubicados en la región del segundo delta: uno en Santa María, y el otro a 30 km del actual canal argentino. Se supone que a medida que avance el atarquinamiento y el desplazamiento del lecho seco hasta los puntos mencionados, es posible que ocurran cambios bruscos en la dirección del cauce del Río Pilcomayo y, como consecuencia de ello, se produzca una invasión del agua más allá de los límites del actual valle de inundación en territorio argentino, desde Santa María, o en territorio paraguayo, a 30 km del actual canal argentino (Kopaliani & Georgievsky, 1993).

En la Figura 23 se muestra uno de los dos mapas rescatado del informe de Cafaro (2010). En el mismo se muestra para las cercanías de la zona de Embocadura, además de las zonas de escurrimiento y detención, los posibles puntos de avulsión y su grado de evolución referido a las posibilidades de avulsión.

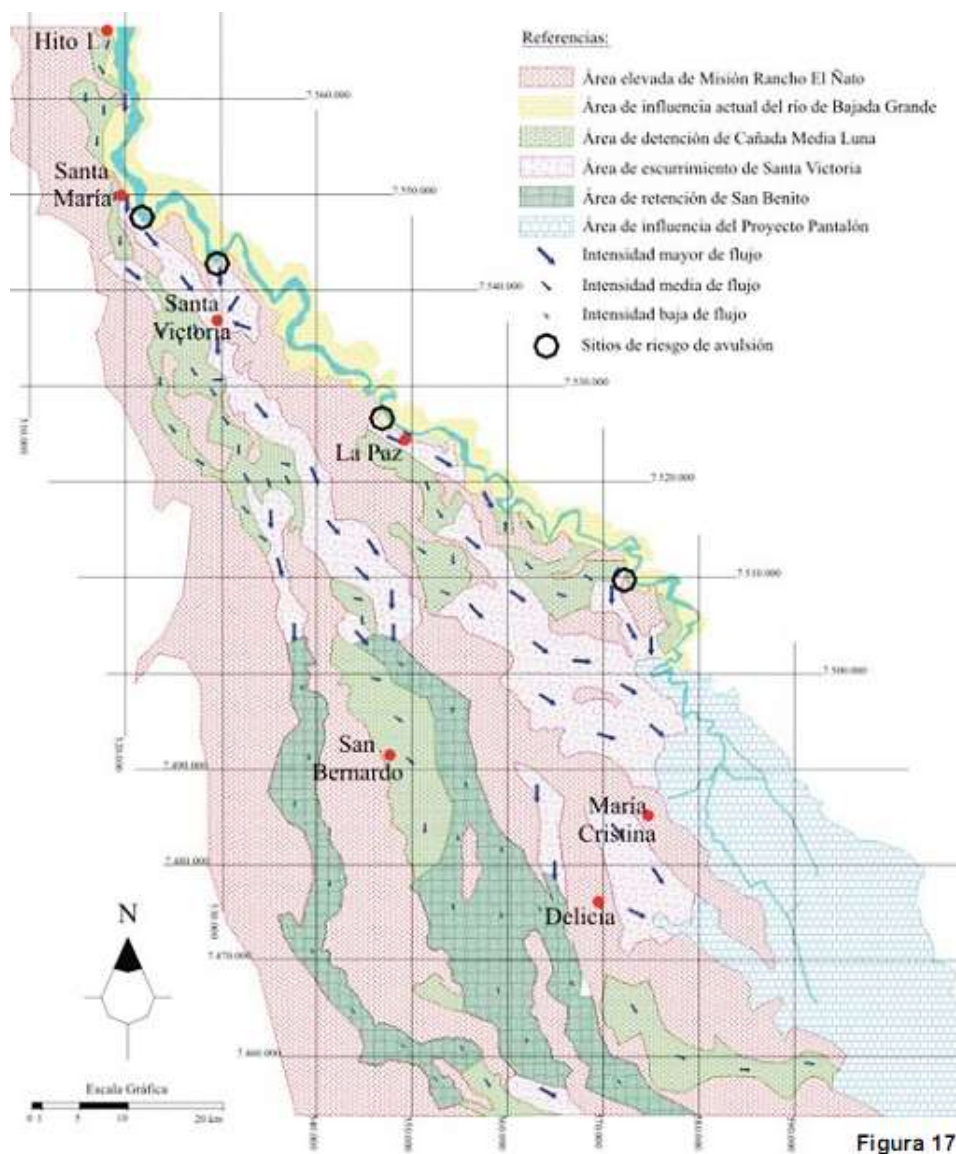


Figura 23.- Mapa de puntos críticos y de escurrimientos (Cafaro E. D., 2010).

Los autores afirman que es necesario advertir que la determinación del grado de criticidad de los puntos señalados en el Río Pilcomayo requiere un profundo estudio y análisis, sobre

todo basado en datos topográficos, dado que el problema a resolver es la interacción de los efectos de diversos fenómenos de naturaleza geológica y de los actuales procesos de dinámica fluvial. Ciertamente el cambio de dirección del curso del río en los puntos críticos N° 1 y N° 2 pueden ser anticipados y artificialmente controlados mediante obras hidráulicas de bajo costo (Kopaliani & Georgievsky, 1993).

2.4.4. Retroceso del Cauce Río Pilcomayo

Una gran particularidad del Río Pilcomayo incluye la problemática del retroceso y divagación de su cauce, que se refiere, en términos generales, al progresivo taponamiento de su curso que, desde comienzos del siglo pasado a la actualidad, ha retrocedido en términos netos aproximadamente 290 km causando serios trastornos con relación al reparto equitativo del recurso hídrico entre los dos países de la cuenca baja Argentina y Paraguay. Pocos kilómetros aguas abajo del ingreso a la provincia de Formosa, en Argentina, el Río Pilcomayo con su alta carga de sedimentos, no tiene suficiente energía para socavar y mantener un cauce estable, produciéndose sedimentaciones recurrentes que han segado el cauce original, forzando a las aguas a desbordar en forma de manto (Halcrow & Serman, 2007). No obstante, el fenómeno es aún más complejo, ya que el taponamiento en sí no se debe originariamente solamente a las arenas que lleva el río, sino también al bioceston depositado en forma de enormes cantidades de troncos de alisos, arboles conocidos también como palo bobo, que posibilita la formación de una malla o trabazón sobre la que, a su vez, se depositarán las arenas (Cordini, 1947). Esta especie fija márgenes, bancos, barras y planicie de inundación bajo distintos escenarios ambientales por el anclaje radicular que generan las raíces conformando una verdadera malla protectora para el suelo aluvial, no obstante, no logra compensar la debilidad estructural de los suelos aluviales y la intensa divagación lateral de los cursos.

Como consecuencia de este retroceso se produce un avance de otros problemas hidrológicos en dirección de aguas arriba. Se observa una distorsión en el abastecimiento de agua en la región y sus consecuencias para el medio ambiente. También se observa un proceso de desertificación aguas abajo del taponamiento. Al retroceder el cauce principal se produce un retroceso contemporáneo de la zona de divagación, ésta incluye la zona donde las aguas desbordan y la zona donde las aguas entran en los humedales. La salinización es otro problema que acompaña el retroceso de la zona de divagación. La geohidrología de la zona muestra que el nivel de aguas salobres se ubica muy cerca de la superficie. La crecida anual en la zona tiene un mayor efecto en la zona de aguas abajo del taponamiento, en una región confinada por humedales, los cuales reciben sus aguas de la crecida y también, más hacia aguas abajo, por la infiltración de las aguas y la nueva aparición de cauces en forma de cañadas, en función de la topografía existente. La cuantificación de los daños en relación con la densidad de la población, y sus modos de vivir, la agricultura, la pesca, la explotación forestal y la cría de ganado vacuno, no está bien definida. El desarrollo de la zona depende mucho del alcance, en dirección aguas abajo, de las aguas de la crecida (Pool M. , 1994).

2.5. Desbordes

El Río Pilcomayo desborda todos los años como consecuencia de las crecidas cuyo caudal supera la capacidad de encauzamiento del río. Los desbordes ocurren aguas abajo de Villamontes cuando el río entra en su cuenca baja, en lo que se ha denominado Pilcomayo Superior. Las aguas de desbordes son importantes para la alimentación de cuerpos de agua superficiales, recarga de acuíferos y el sector agropecuario, pero perjudiciales para las poblaciones que sufren inundaciones con las consecuentes pérdidas materiales, aislamiento debido a la rotura de infraestructura vial o anegamiento de los ingresos además de la pérdida de terreno para cultivo por enlame, encharcamiento y erosión de barrancas.



Figura 24.- Erosión de Barrancas (Gobierno de la Provincia de Salta, 2013)

El cauce del Río Pilcomayo, en su retroceso, no solo es abandonado y reemplazado por otro nuevo, sino y lo que es más importante, es rellenado al igual que su área de influencia, lo que trae aparejado un cambio total en la fisiografía del lugar. Esto hace que numerosos bañados, esteros y lagunas, que existían en una época dada, ya no existan en la actualidad, como el Estero Patiño, seco desde el año 1972.

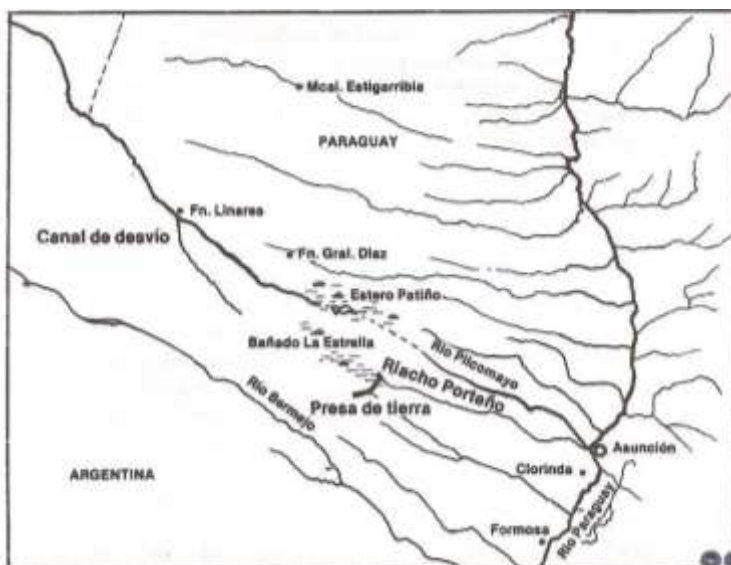


Figura 25.- Mapa que muestra dónde se encontraba el Estero Patiño (Salúm Flecha, 1983).

En cuanto a la hidrología, los cambios han sido tan drásticos que, datos de hace pocos años, ya no nos sirven. Así por ejemplo, toda la información de la estación de aforo de Fortín Nuevo Pilcomayo, en seco y abandonada desde 1968, ya no tiene ningún valor actual y solo sirve para correlacionarla con estaciones aguas arriba (Misión La Paz y Villamontes) en los años de su funcionamiento.

El tramo entre Villamontes y la frontera con Argentina puede ser asociado al de salidas de montaña a la llanura, mediante un amplio valle. En el Río Pilcomayo este tipo de proceso fluvial, a diferencia de los ríos montañosos y precordilleranos que aportan material aluvial de gran tamaño, se realiza acareando sedimentos compuestos de grava y arena, lo cual constituye una excepción. La causa radica en el volumen extraordinariamente grande de sedimentos que transporta este río y en el idéntico régimen de escurrimiento al de ríos de montaña y precordillera, en el cual resultan característicos los aumentos periódicos y relativamente cortos de nivel de aguas, que escurren con diferentes intensidades. Este tipo de régimen fluvial que se establece en valles totalmente inundados y con pequeñas profundidades, se transforma en el mecanismo determinante del carácter errático del lecho del río, el cual adopta la forma de cauce con múltiples brazos en un valle rocoso (Kopaliani & Georgievsky, 1993). También es importante recordar que el río durante la crecida transporta una numerosa cantidad de troncos y material vegetado que son depositados principalmente en la rama descendente del hidrograma.



Figura 26.- Material Vegetado en Canal Paraguayo, año 2011 (Amarilla L. , 2014)



Figura 27.- Material Vegetado en Canal Paraguay, año 2011 (Amarilla L. , 2014)

Los desbordes tienen el comportamiento de surcos de derrame digitado (como dedos de una mano) normalmente asociados a roturas de albardones. Presentan un patrón que se puede caracterizar en tres zonas contiguas (proximal, media y distal) a medida que se aleja de la traza del río hacia la llanura de inundación sobre margen derecha (Cafaro E. D., 2007).



Figura 28.- Derrame en tapón, aguas relativamente altas, ver la desaparición del cauce (Martín Vide, Amarilla, Gamarra, & Zárate, 2007)

La zona proximal posee las embocaduras de los surcos de desborde que se caracterizan por ser de cauce único, con secciones transversales de tamaños diversos, paralelos y separados entre sí con distancias que no superan los 20 metros. En ellos se encuentra una gran cantidad de troncos, transportados por el río durante las crecientes, acumulados en las inmediaciones de la margen. Esta zona posee una densa vegetación leñosa con tamaños medios a grandes, provocando que se acumulen troncos sobre la margen y una morfología del depósito de derrame de tipo: erosión en herradura y depósito aguas abajo del árbol.

La zona media, ubicada a una distancia promedio de 50 metros respecto del río, tiene la particularidad de que los surcos se subdividen en otros de dimensiones diversas y más pequeños, separados entre sí por montículos arenosos o areno-limosos. Presenta un bosque bajo con arbustales y matorrales. En tres sitios se observó que tal zona se extiende entre 150 y 850 metros.

En la zona distal se produce el depósito de los sedimentos finos (mayoritariamente limos) que son transportados por el río como carga de lavado. Esta zona cubre áreas mucho mayores que las anteriores, se caracteriza por tener pendientes casi horizontales con baja densidad de vegetación y desprovista de árboles grandes (Cafaro E. D., 2007).



Figura 29.- Desborde la Gracia (Gobierno de la Provincia de Salta, 2013)



Figura 30.- Desborde del Río Pilcomayo (Gobierno de la Provincia de Salta, 2013)

La Figura 31 y Figura 32 identifican las zonas de desbordes del Río Pilcomayo.

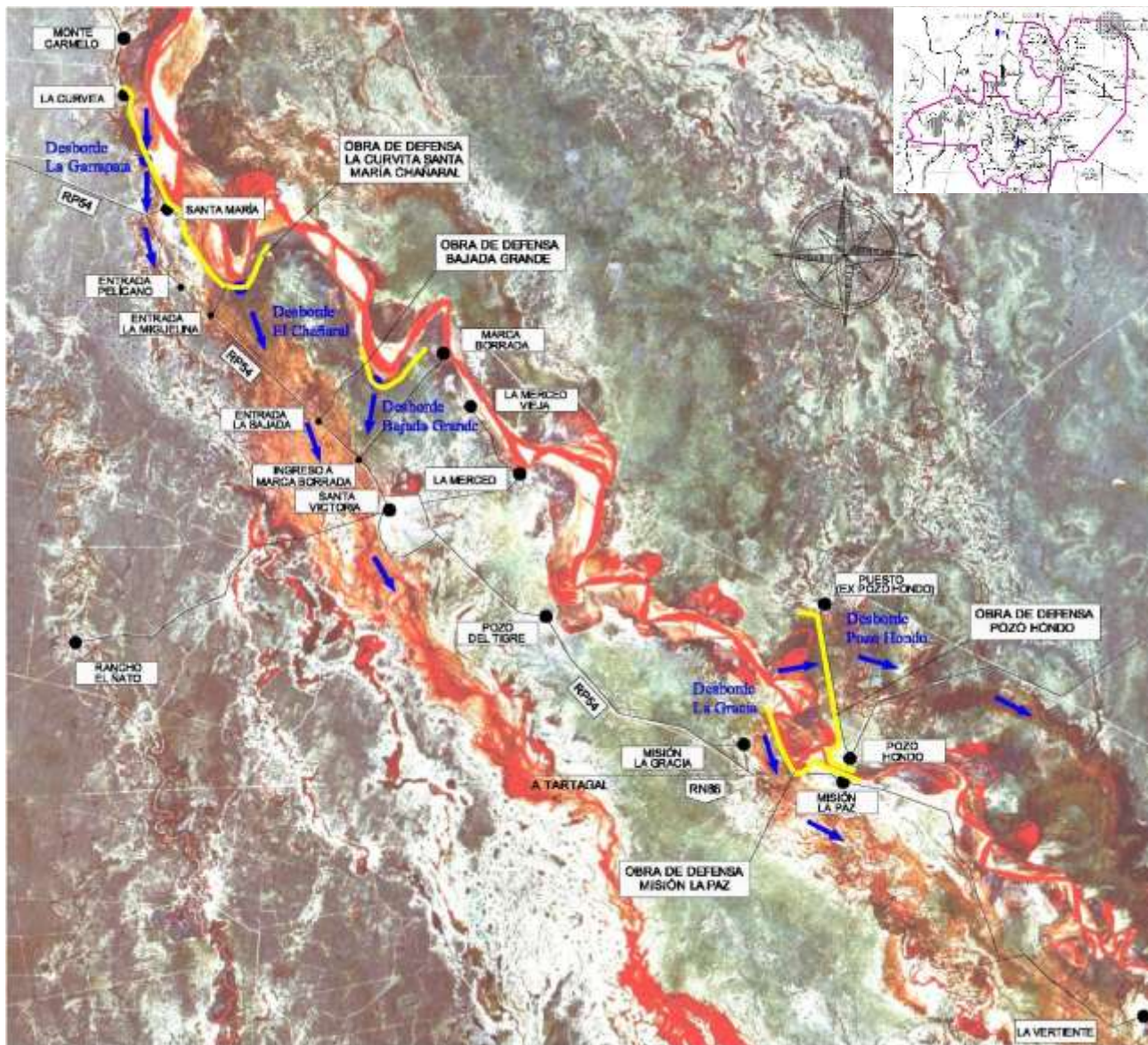


Figura 31.- Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas arriba de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral, 2012).

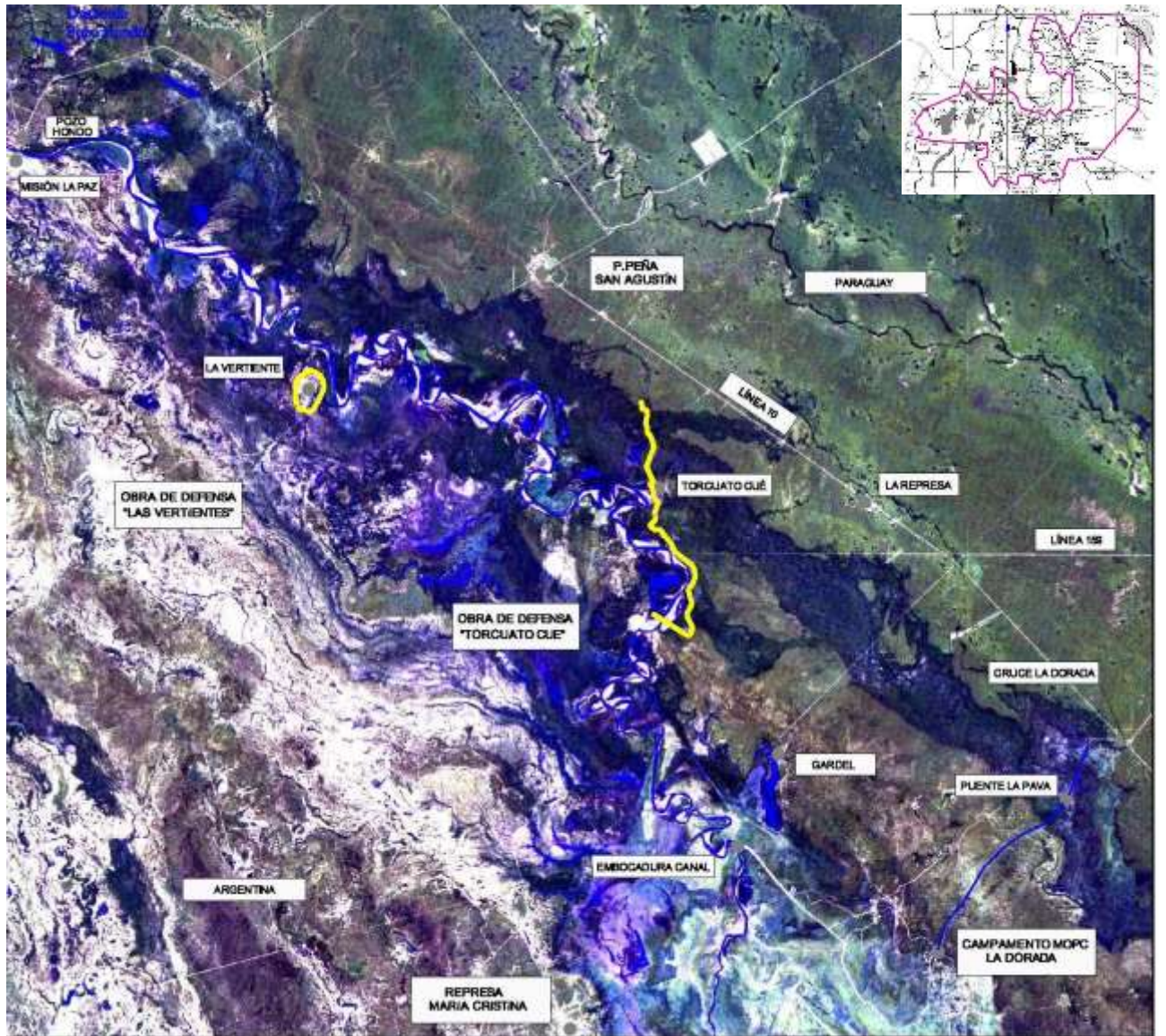


Figura 32.- Plano de Ubicación de los puntos de Desborde, aguas abajo de Misión La Paz y Ubicación de Proyectos de Intervención (Corral, 2012).

2.6. Avulsión

La avulsión es el proceso natural por el cual el flujo de un río diverge del cauce hacia un nuevo curso permanente en la planicie de inundación adyacente. La avulsión es una de las características principales de las planicies en proceso de sedimentación.

Los geomorfólogos denominan avulsión a la relocalización abrupta de ríos. Además de este efecto inmediato hay otros efectos relacionados: cerca del ápice del cono aluvial resultante, el suelo fértil queda metros enterrado por sedimento nuevo y el drenaje y los canales de irrigación se colmatan. Aguas abajo, luego de que el flujo se ha desprendido de la carga de sedimento, el agua relativamente limpia erosiona nuevos canales y desestabiliza las márgenes. Incluso más lejos aguas abajo, en la costa deltaica, la erosión costera aumenta significativamente al cortarse la carga de sedimentos. Aguas arriba del sitio de avulsión, el río se desestabiliza por un quiebre abrupto de la pendiente en el perfil longitudinal o knickpoint. No obstante, la avulsión también trae beneficios, al forzar un reposicionamiento a gran escala del cauce del río es la mayor causa de humedales y un

mecanismo dominante en la generación de planicies de inundación, deltas, conos aluviales y sus depósitos sedimentarios asociados, incluyendo reservorios de agua potable e hidrocarburos (Slingerland & Smith, 2004).

Los principales componentes de una avulsión son el canal principal, que es aquel cauce estable cuyo flujo divergirá, y un cauce de avulsión que se forma como consecuencia de la avulsión. La avulsión puede ser completa, todo el flujo es transferido desde el cauce principal, o parcial, cuando solo se transfiere una parte del flujo. La avulsión completa resulta en un abandono del cauce principal aguas abajo del punto de divergencia, mientras que la avulsión parcial lleva a nuevos canales que coexisten con el cauce principal. La avulsión parcial resulta en canales entrelazados (si los canales son activos y se juntan aguas abajo) y canales distribuidores (si no se juntan), esta última es una característica de los conos de avulsión y deltas (Figura 33).

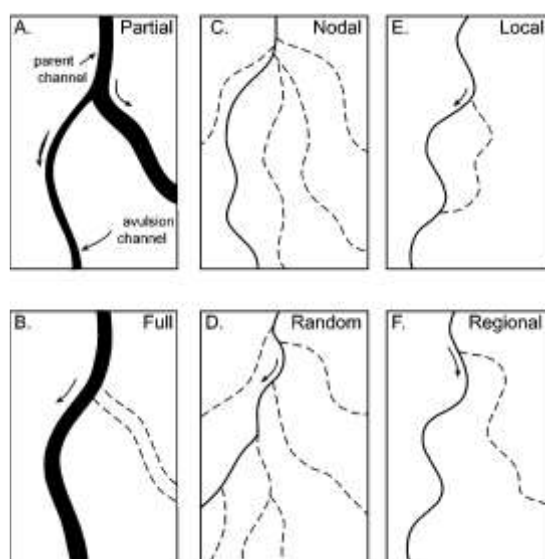


Figura 33.- Esquemas de tipos de avulsión (Slingerland & Smith, 2004).

Clasificaciones adicionales para distinguir el comportamiento de la avulsión incluyen: nodal versus aleatoria y local versus regional. Las avulsiones nodales son eventos recurrentes que ocurren en una misma zona, mientras que las aleatorias pueden ocurrir en cualquier parte dentro del cauce activo. Una avulsión local es la que se une al cauce principal aguas abajo, la avulsión regional ocurre a mayor escala y afecta la localización del cauce en cualquier lugar aguas abajo. Las avulsiones son generalmente jerárquicas, por ejemplo, una divergencia aguas arriba, total o parcial, puede desarrollar un nuevo sistema de canales que presenta variadas avulsiones, más pequeñas, mientras evoluciona. La avulsiones pueden ser abruptas o graduales, estas últimas pueden llevar siglos para completarse.

La avulsión es una de las características principales de las planicies en sedimentación, la frecuencia de avulsión varía ampliamente desde 28 años (Río Kosi que corre entre India y Nepal) a 1400 años (Río Misisipi en Estados Unidos). Cualquier evolución del sistema fluvial que lleve a aumentar la capacidad de transporte de sedimentos en una divergencia debe ser una condición necesaria para que ocurra la avulsión. Se piensa que altas tasas de sedimentación en el canal principal son un proceso clave en este fenómeno. Diversos

autores como Bryant, Falk, & Paola (1995), Heller & Paola (1996), Makaske (1998), Törnqvist & Bridge (2002) y Ashworth y otros (2007), han observado que la frecuencia de avulsión aumenta cuando se eleva la tasa de sedimentación.

En muchos sistemas fluviales, elevadas tasas de sedimentación están correlacionadas con márgenes del canal aluviales sobreelevadas (alluvial ridges) y canales dominantes (Figura 34). Quizás por esta razón los investigadores se han enfocado en la relación entre pendientes elevadas de superficies de agua en los trasvases de albardones con la pendiente del canal principal como criterio principal para que ocurra la avulsión. Este criterio ha sido expresado de varias maneras: a) diferencia de elevación límite entre albardones y su llanura de inundación adyacente b) una sobreelevación normalizada (por ej. elevación natural de albardones por sobre la llanura de inundación adyacente dividida por la profundidad del canal principal) o c) una pendiente crítica topográfica o de energía desde la sobreelevación aluvial hasta la llanura de inundación, medida como múltiplo de la pendiente del canal o del valle.

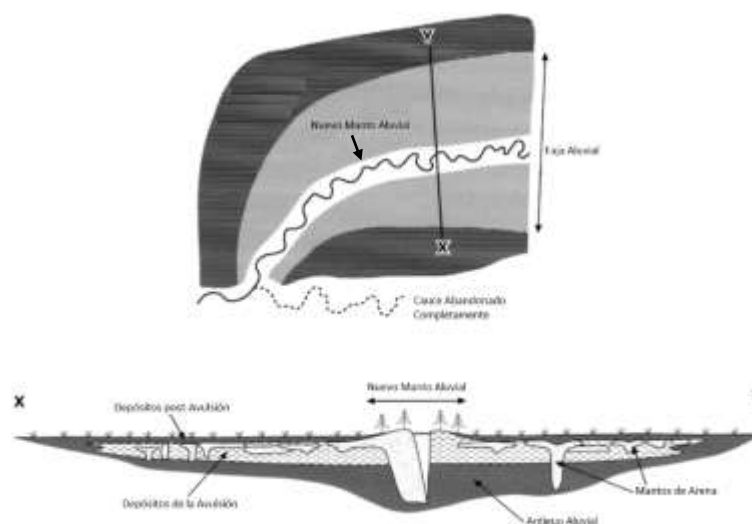


Figura 34.- Esquema de componentes principales de un sistema con avulsión. (Makaske, 2001)

Según se explica en (Guccione, Burford, & Kendall, 2009), el bajo Mississippi ha sufrido avulsiones con cocientes de pendientes en el rango de 3 a 5, consistente con predicciones teóricas. No obstante en algunos casos se han medido relaciones de pendientes con un orden de magnitud mayor y no ha ocurrido avulsión.

Las causas de mayor sedimentación pueden ser: aumento de la carga de sedimentos en relación con la capacidad de transporte, cambio en el caudal pico o descenso del gradiente del canal debido a factores como: aumento de sinuosidad, extensión del delta, disminución del nivel base que impone al río una menor pendiente, levantamiento tectónico aguas abajo, o elevación del nivel base.

En el caso del Pilcomayo, el retroceso de su cauce, la elevada cantidad de desbordes, la alta tasa de transporte de sedimentos, las bajas pendientes en la cuenca baja, el cauce colgado y los anegamientos obligan a considerar en el análisis del río la posibilidad de una avulsión. Entre las posibles zonas de avulsión sobre el Río Pilcomayo se pueden contabilizar las zonas de desbordes denominados “El Chañaral”, “La Gracia”, “La Puerta”

y “Pozo Hondo”, ya presentados en la Figura 4. La Tabla 5 resume las zonas de desborde aguas abajo de Misión La Paz y su estado de avulsión.

Tabla 5.- Localización de Zonas de Desbordes y Estado de Avulsión (Farías & Cafaro, 2010).

Margen	Coordenadas		Estado de Avulsión
	X	Y	
MD	560036.681	7516602.783	Alto
MD	557196.750	7518801.510	Alto
MD	555982.495	7518917.232	Alto
MI	579806.216	7504046.720	Medio
MI	578247.457	7500941.108	Medio
MD	577406.137	7505132.038	Medio
MI	578299.267	7509481.540	Medio
MD	574962.403	7499611.916	Medio
MD	572053.067	7509119.177	Medio
MD	571898.054	7512113.209	Medio
MD	569572.862	7512577.800	Medio
MD	564664.124	7513094.012	Medio
MD	5775810.857	7506899.465	Baja
MD	5748940.967	7508448.101	Baja
MI	5746180.138	7512536.782	Baja
MI	5662630.205	7517630.523	Baja
MI	5625320.884	7518199.885	Baja
MI	5613930.064	7519700.930	Baja
MI	5594240.281	7521201.975	Baja
MI	5589510.246	7522509.052	Baja
MI	5579510.799	7523676.655	Baja
MI	5570170.219	7526266.683	Baja

La Figura 35 muestra las líneas centrales del cauce del río digitalizadas para caudal de estiaje aguas abajo de Misión La Paz. García y otros (2014) comenta que el desplazamiento de la línea central del cauce, en la parte de aguas abajo del tramo, puede sugerir la ocurrencia de avulsiones o la re-ubicación del thalweg del cauce para caudal de estiaje dentro de la anchura aluvial más amplia.

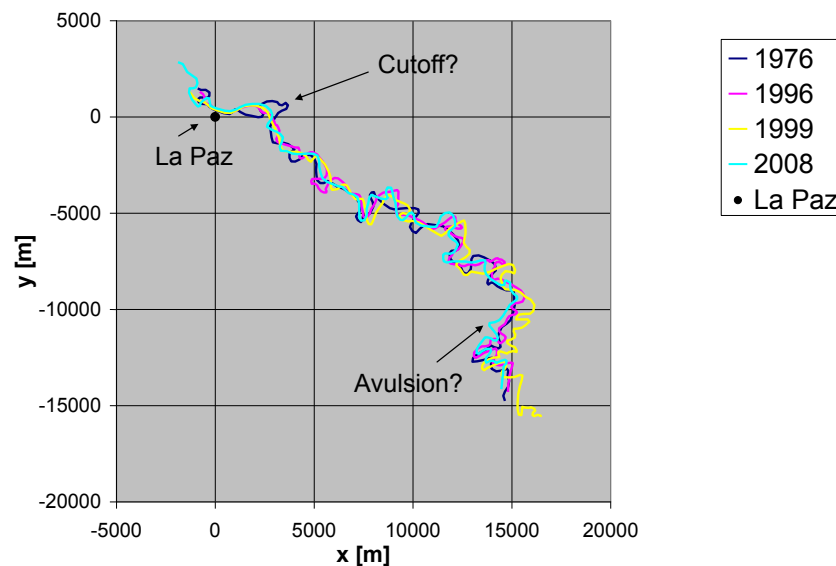


Figura 35.- Líneas de centro del cauce en los años 1976, 1996, 1999 y 2008 digitalizadas (García, y otros, 2014)

3. Hidrometría

Se poseen dos estaciones hidrométricas de importancia para la cuenca baja, una localizada en Villamontes, Bolivia, en la entrada de la cuenca baja y que proporciona los caudales erogados desde Bolivia hacia Argentina/Paraguay y otra localizada en Misión La Paz, Argentina, en el límite con Pozo Hondo, Paraguay, que proporciona los caudales que arriban a esta sección después de las perdidas por desbordes naturales y que serán los caudales que luego arribarán a la “Embocadura”.

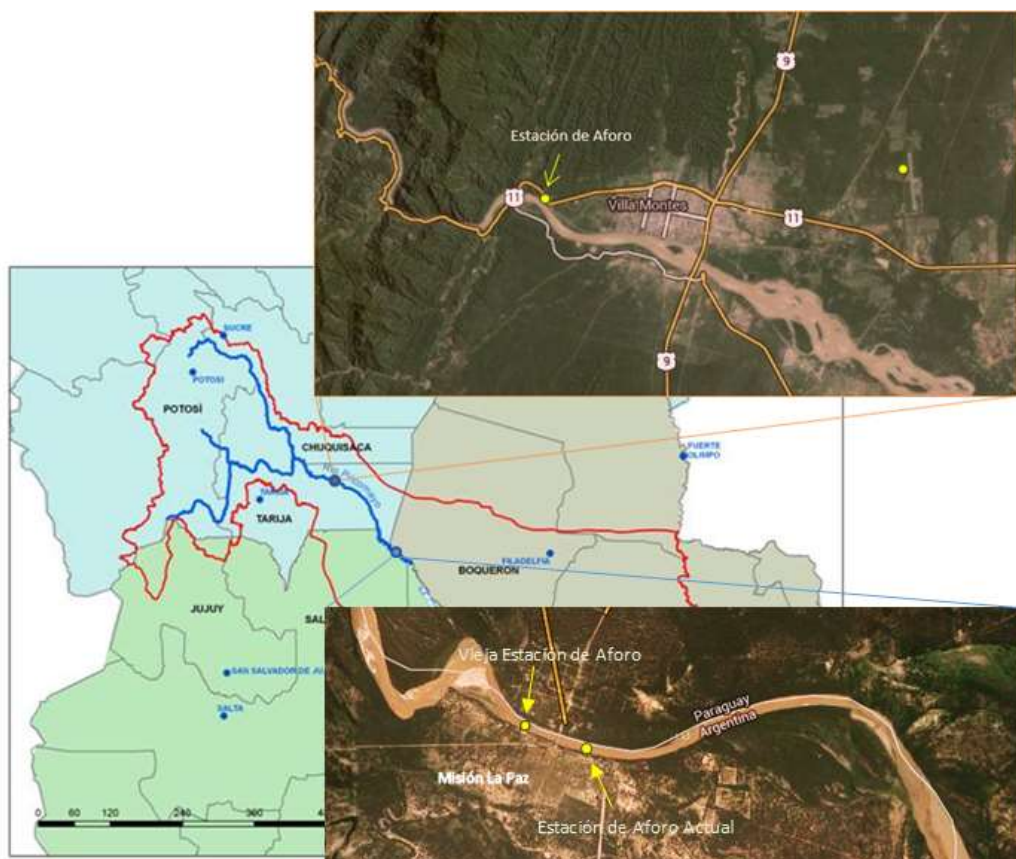


Figura 36.- Localización de las Estaciones en Villamontes y Misión La Paz (Dirección Ejecutiva, 2014).

3.1. Estación en Villamontes

La sección de aforo de Villamontes (Figura 36) se encuentra en la localidad de mismo nombre en Bolivia, en el departamento de Tarija a los 21,26 ° Latitud Sur y 63,50 ° Longitud Oeste a 407 msnm y es operada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia (SENAMHI). Es una sección bastante estable ubicada al pie de los Andes unos kilómetros aguas arriba del comienzo de la cuenca baja, donde sus sedimentos todavía son gruesos. Aguas abajo de la localidad de Ibibobo el río se vuelve trezado e inestable. La importancia de esta estación es que proporciona los caudales tanto líquidos como sólidos de ingreso a la cuenca baja. En la estación de Villamontes se posee instrumental Pluviométrico, de Calidad de Agua e hidrometría. Los datos pluviométricos y de niveles se transmiten en tiempo real.

En esta estación se poseen registros de caudales medios diarios desde agosto de 1976 y registros de sedimentos en suspensión y granulometría desde 1981. El caudal más

frecuente es del orden de 37 m³/s, el caudal medio anual de 237 m³/s y los picos de crecidas han llegado a 6500 m³/s.

Se poseen aforos para lecturas de escala que no superan los 3,30 m. Actualmente no se afora con molinete y vagoneta en lecturas de escalas que superen los 3,00 m por cuestiones de seguridad. Cuando se supera esta lectura se afora con flotadores. A partir de enero del 2014 se ha comenzado a aforar durante crecidas, no obstante todavía no hay datos de picos de crecida.

Se poseen aforos desde septiembre de 1976, no obstante para la curva H-Q se utilizan valores a partir del año 2004, cuando se empieza a aforar desde la vagoneta, ya que los valores anteriores no son lo suficientemente confiables. Se espera en el futuro poder corregir y vincular ambas series 1976-2004 y 2004-2014. Se ajustan los puntos a una curva de la forma $Q = C (H - H_0)^{5/3}$

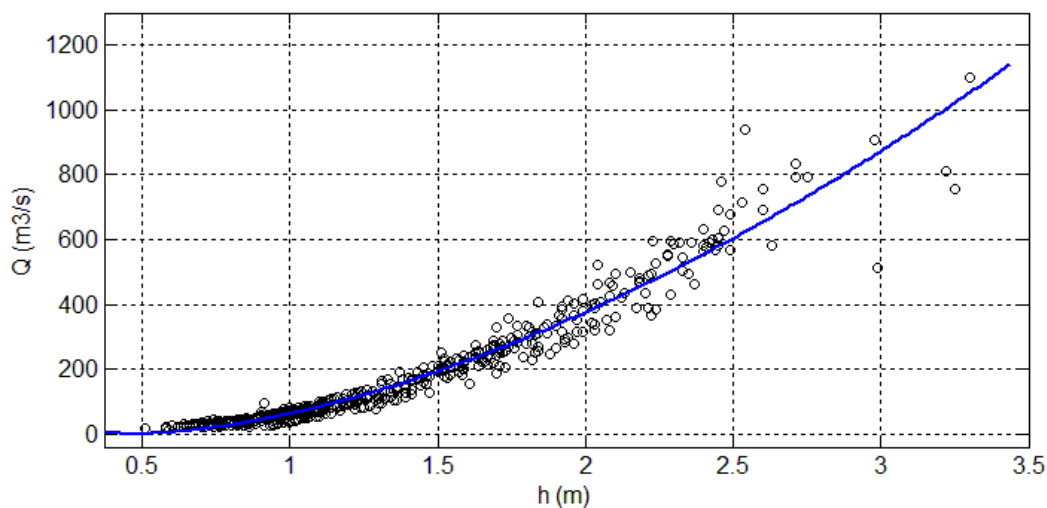


Figura 37.- Curva Altura-Caudal a partir de aforos en Villamontes desde 26/03/2004 al 29/4/2014, SENAMHI. Fuente: Elaboración Propia.

La relación entre la lectura de Escala y el Caudal es: $Q = 187,1 (H - 0,48)^{5/3}$, $R^2 = 0,95$



Figura 38.- Estación de aforo en Villamontes, Bolivia, Vista hacia aguas abajo, julio 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).



Figura 39.- Sensor Kalesto y Torre de sección de aforo julio 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).



Figura 40.- Vista hacia aguas arriba, julio 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).



Figura 41.- Sección de aforo por vagoneta; septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi, & Testa Tacchino, 2013).

3.1.1. Curva de descarga

Se superpuso una topografía para mostrar cómo es la sección fuera de la sección de aforo de Villamontes (La Figura 42). Los datos topográficos son del 20 de noviembre de 2013 y fueron proporcionados por la DE-CTN del Río Pilcomayo. A la topografía se le superpuso un aforo, en el cual la superficie de agua se encuentra a los 0,88 m de lectura de escala. Se puede dividir la sección de aforo en secciones horizontales, donde se observan cambios de pendiente en las márgenes: una hasta 0,88 m de lectura de escala, otra hasta 2,08 m y otra hasta los 4,10 m. Se calculó una curva H-Q para cada rango de lecturas de escala (Figura 43, Figura 44 y Figura 45).

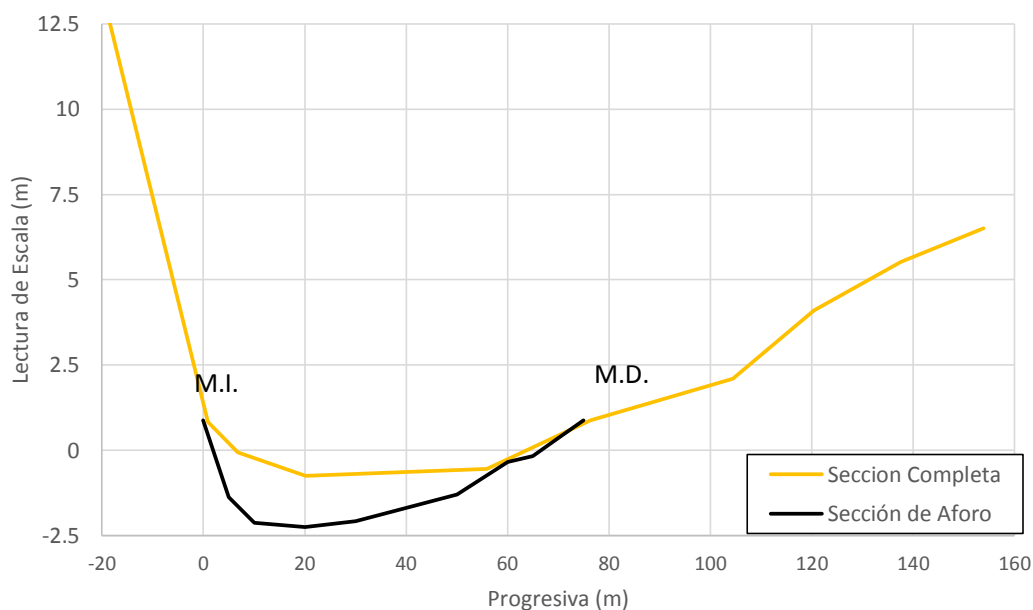


Figura 42.- Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.

La Figura 43 presenta la relación h-q para los aforos con lectura de escala hasta 0,88 m. Se observa que la correlación no es muy buena. Esto se debe a que la sección varía año a año para caudales bajos. La ecuación que mejor ajusta es:

$$Q = 51,64(H)^{5/3} \quad R=0,56$$

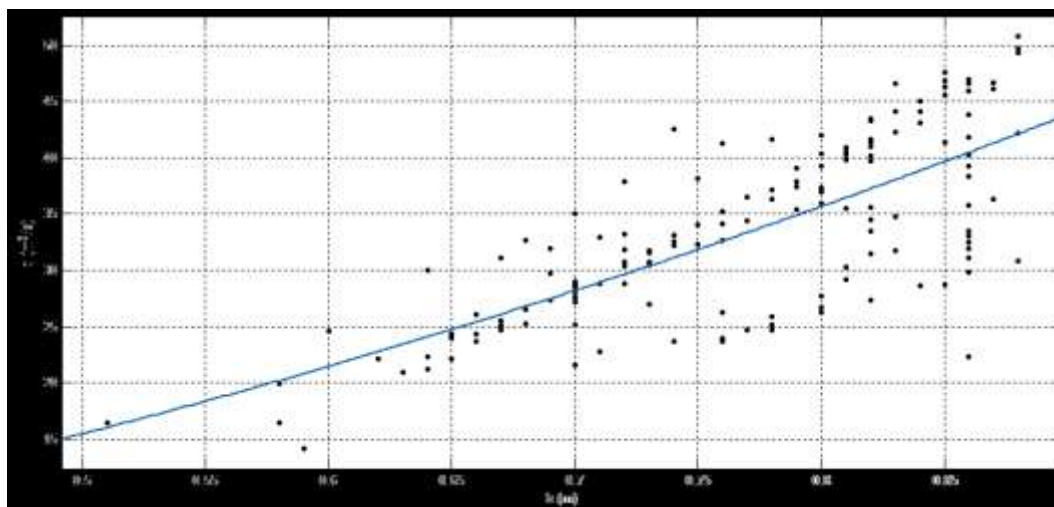


Figura 43.- Curva H-Q para lecturas de escala hasta 0,88 m.

Para valores de lectura de escala entre 0,88 m y 2,08 m se observa menos dispersión. La Figura 44 presenta los puntos de aforos, una curva de ajuste y un rango que contiene el 90% de los puntos que se obtiene variando H_0 entre 0,470 y 0,489, si se toma C fijo.

$$Q = 183,2 (H - 0,48)^{5/3} \quad R=0,93$$

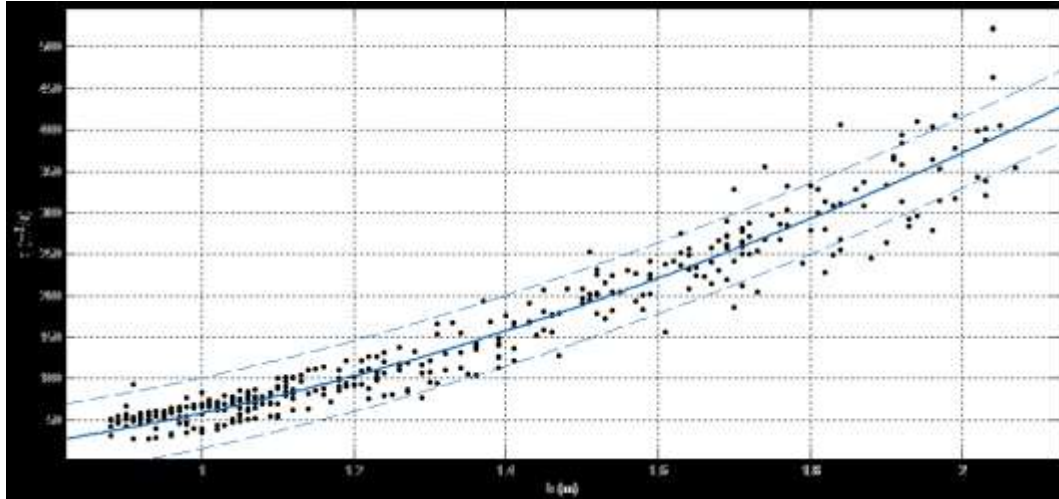


Figura 44.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 0,88 m a 2,08 m.

La Figura 45 presenta los valores de h y q para los aforos con lectura de escala mayor a los 2,08 m. La ecuación que mejor ajusta es:

$$Q = 189,7 (H - 0,48)^{5/3} \quad R=0,56$$

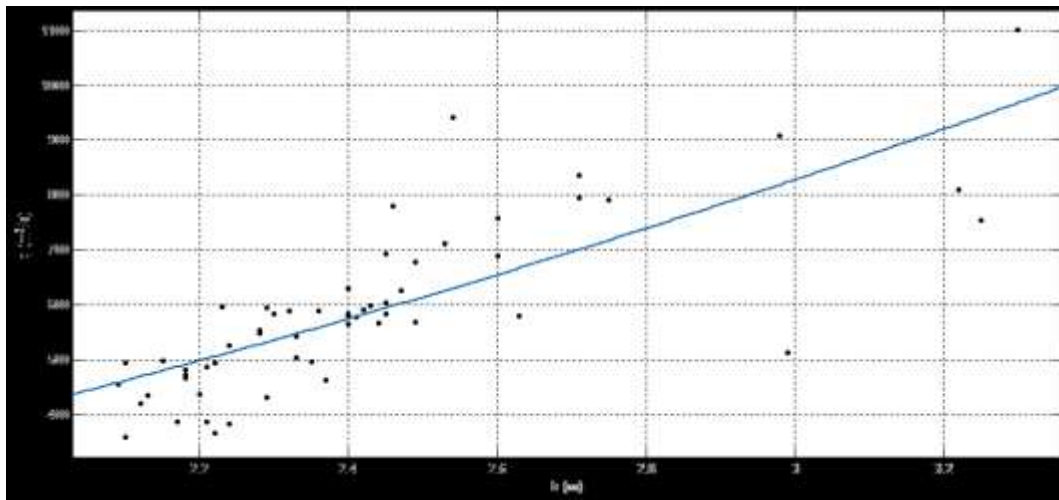


Figura 45.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 2,08 m.

3.1.2. Estabilidad de la sección

La Figura 47 presenta la variación del fondo de la sección de aforo en Villamontes, consecuencia de la erosión general transitoria durante el paso aguas altas en enero de 2014. La Figura 49 muestra el movimiento de fondo para aforos diarios en febrero de 2014 y la Figura 46 los niveles registrados por el sensor durante el periodo de aforos. Es importante tener presente la variabilidad del fondo en el momento de utilizar o calcular las curvas H-Q.

Si observamos la Figura 47, antes de la crecida, y la Figura 49, después de la crecida, se puede observar que el lecho se encontraba a los -2,50 m de lectura de escala antes del paso de la crecida y luego se encuentra en los -7,00 m, para ir subiendo nuevamente con el transcurso de los días hasta los -4,60 m en el periodo analizado. Es marcado que para igual lectura de escala la sección es muy distinta si es la rama ascendente o descendente del hidrograma.

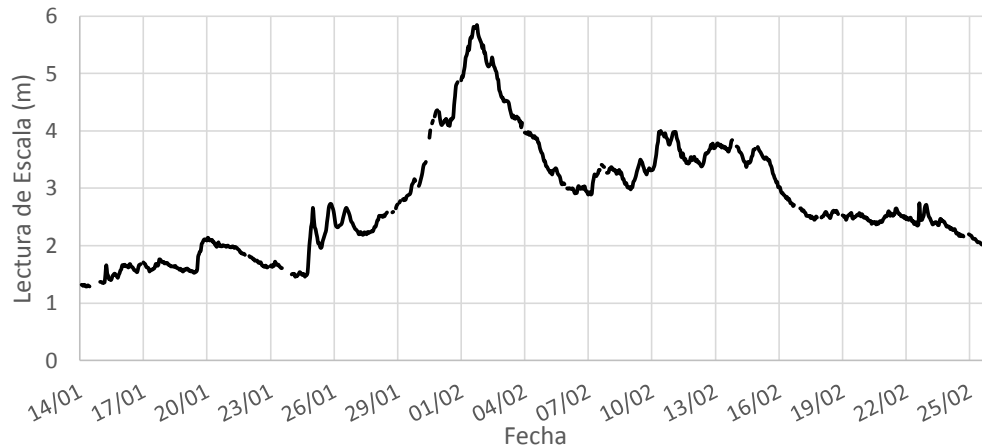


Figura 46.- Lecturas de escala durante enero y febrero de 2014.

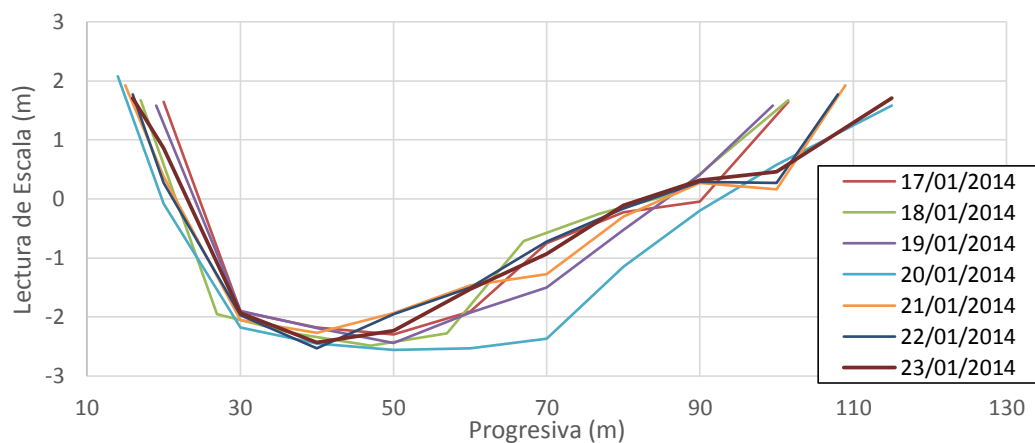


Figura 47.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)

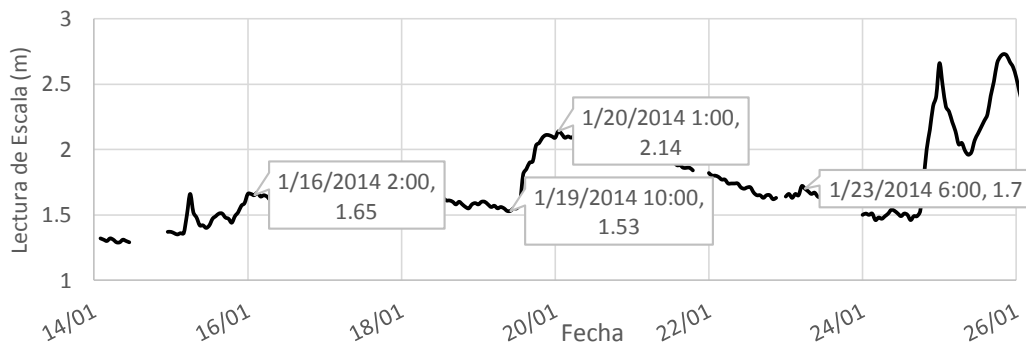


Figura 48.- Niveles durante los aforos enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)

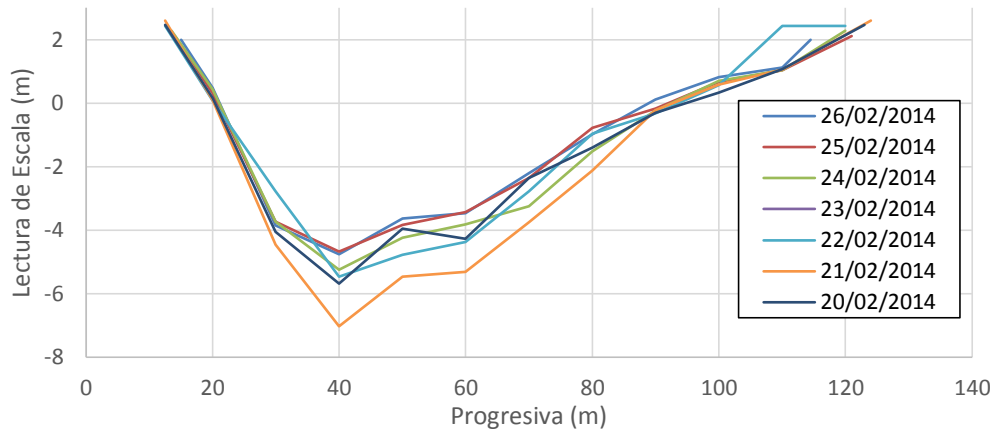


Figura 49.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)

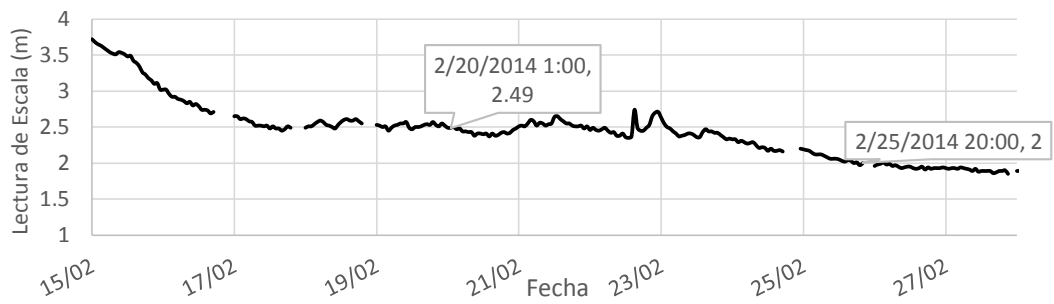


Figura 50.- Niveles durante los aforos febrero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)

3.2. Estación en Misión La Paz

La sección de aforo de Misión La Paz se encuentra en la localidad homónima de Salta (Figura 36), 300 m aguas abajo del Puente Internacional que une Argentina con Paraguay, a los 22°22'49.730" Latitud Sur y 62°30'55.275" Longitud Oeste a 230 msnm. La estación de aforo es operada por EVARSA, empresa concesionaria dependiente de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. La sección es nueva, ya que antes se encontraba unos 500 m aguas arriba, donde se localiza la Casa de EVARSA, estación que en el año 2009 fue destruida por una crecida. La sección actual entró en funcionamiento el 20 de noviembre de 2009. Se poseen registros de Caudales medios diarios para Misión La Paz desde el año 1961. La sección en Misión La Paz se caracteriza por ser altamente variable, las curvas altura-caudal se deben calcular para cada crecida. La estación de MLP incluye estaciones pluviométrica, de calidad de agua, climatológica ordinaria, termométrica e hidrométrica. Los datos de niveles se transmiten en tiempo real.

La Figura 51 presenta los valores de lectura de escala y caudal para los aforos en la vieja sección, dónde se puede observar la gran dispersión de valores.

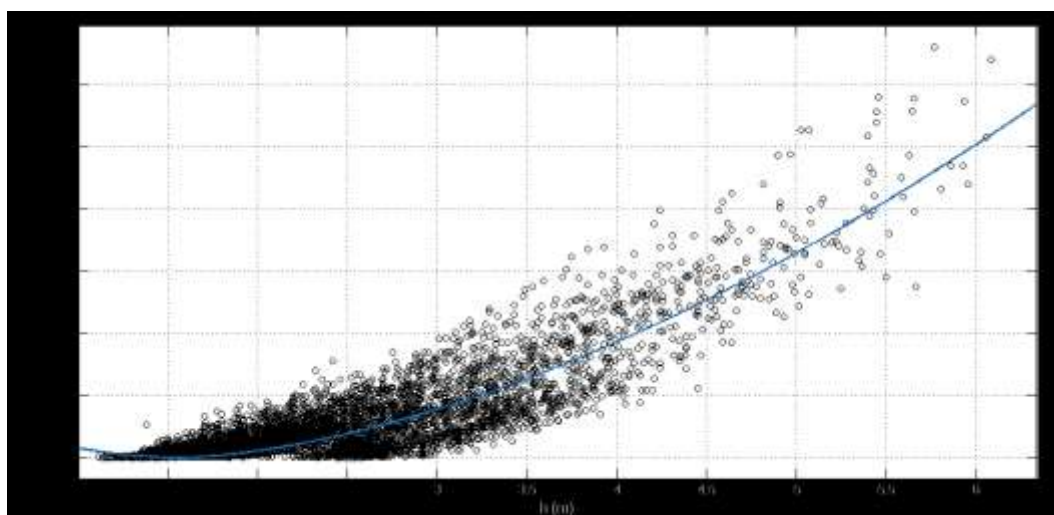


Figura 51.- Curva Altura- Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/9/1972 al 20/8/2009, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia.

$$Q = 208,1 (H - 1,545)^{5/3} R^2 = 0,78$$

La Figura 54 presenta las lecturas de escala y los caudales aforados, a partir de enero de 2010 en la nueva sección. Se observa que la dispersión de resultados es menor que en el caso anterior, no obstante debido a la gran variabilidad de la sección se debe calcular, como ya se ha mencionado, una H-Q para cada evento.

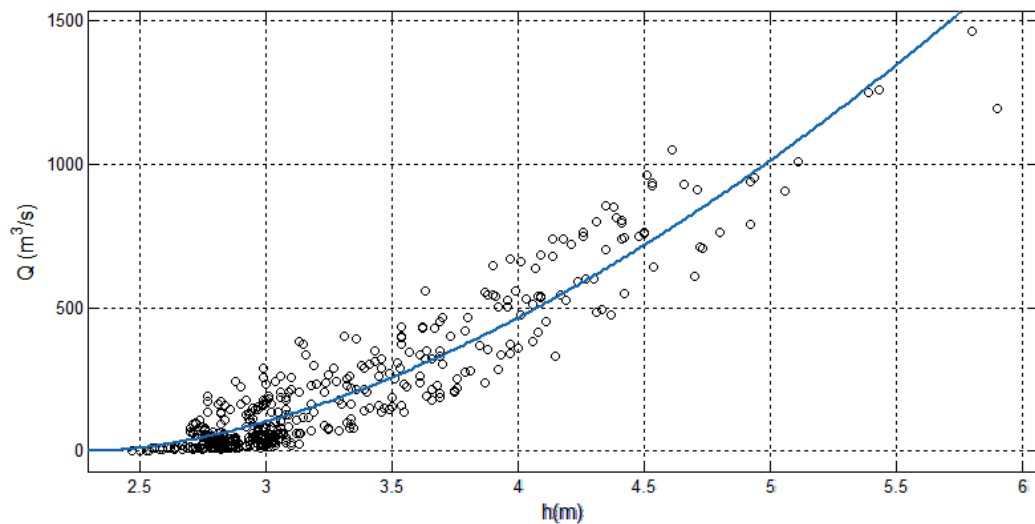


Figura 52.- Curva Altura - Caudal a partir de aforos en Misión La Paz desde 1/1/2010 al 24/5/2014, datos de la DE-CTN. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se presenta una formulación del tipo H-Q que solo debe tomarse como una primer valor de referencia. Es importante recordar de nuevo que hay que calcular una H-Q para cada crecida.

$$Q = 195,9 (H - 2,319)^{5/3} R^2 = 0,88$$



Figura 53.- Sección de aforo en Misión La Paz, Argentina, al frente Pozo Hondo, Paraguay, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).



Figura 54.- Vista hacia aguas abajo de la sección de aforo, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).



Figura 55.- Vista hacia aguas arriba de la sección de aforo de Misión La Paz, se observa el puente internacional, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).



Figura 56.- Puente internacional y Sensor de Nivel (OTT), vista desde aguas abajo, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).

3.2.1. Curva de descarga

Se superpuso una topografía para mostrar cómo es la sección fuera de la sección de aforo en Misión La Paz (Figura 57). Los datos topográficos son del 26 de Septiembre de 2013 y fueron proporcionados por la DE-CTN del Río Pilcomayo. A la topografía se le superpuso un aforo, en el cual la superficie de agua se encuentra a los 2,94 m de lectura de escala. Se puede dividir la sección de aforo con dos horizontales, donde se observan cambios de pendiente en las márgenes: una hasta 3,12 m de lectura de escala, otra hasta 4,90 m. Se calculó una curva H-Q para cada rango de lecturas de escala

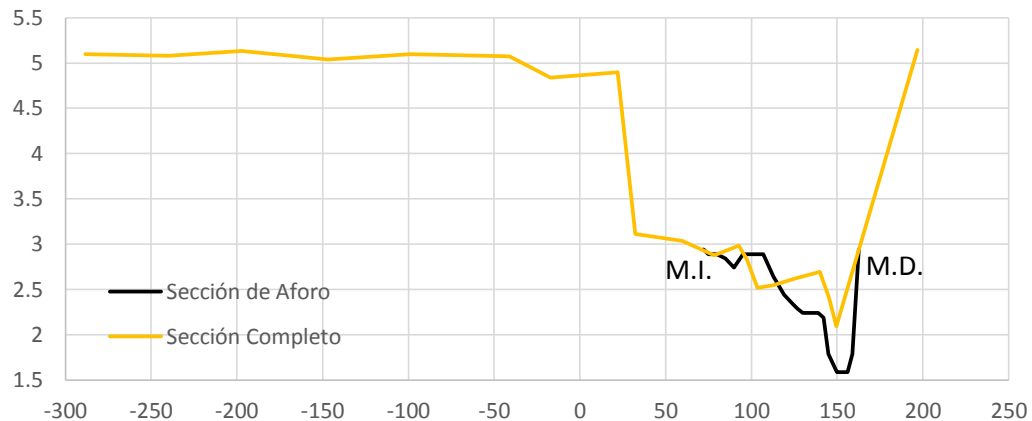


Figura 57.- Sección de Aforo en Villamontes con topografía fuera del Cauce.

La Figura 58 presenta todos los aforos disponibles hasta una lectura de escala de 3,12 m. Se observa mucha dispersión, que impide ajustarla a una curva. Esto se debe a que la sección es muy variable.

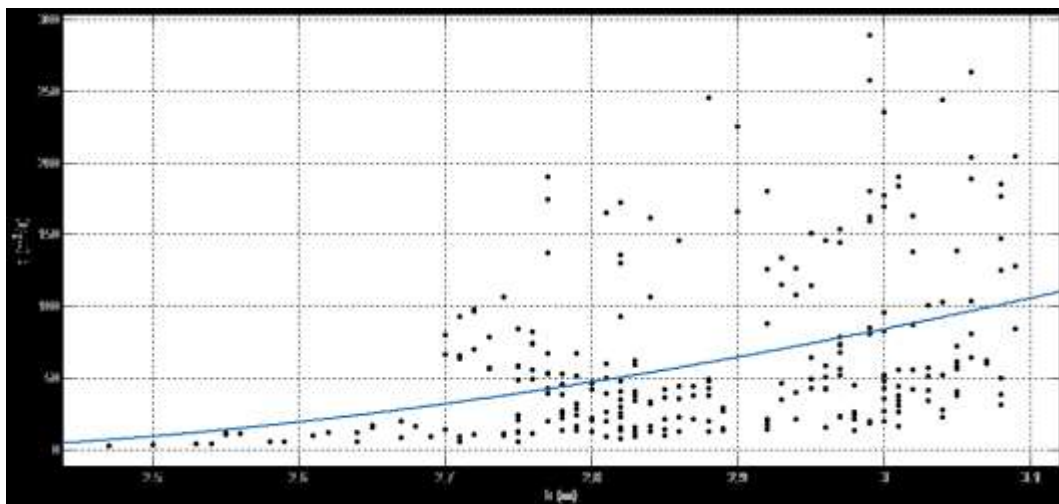


Figura 58.- Curva H-Q para lecturas de escala hasta 3,12 m.

La Figura 59 presenta los aforos con lectura der escala en 3,12 m y 4,10 m, se observa poca dispersión y se ha delimitado un rango que contiene el 90% de los aforos. La ecuación que mejor ajusta es:

$$Q = 206,7 (H - 2,319)^{5/3} \quad R^2=0,78$$

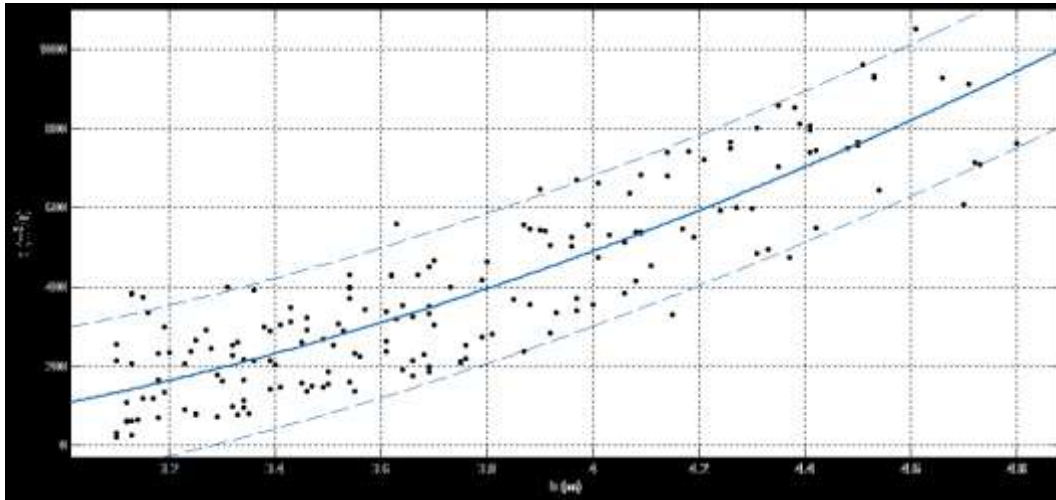


Figura 59.- Curva H-Q para lecturas de escala desde 3,12 m hasta 4,10 m.

Para lecturas de escala mayores a los 4,10 m no se disponen muchos aforos. Se presentan en la Figura 60 los valores disponibles y a continuación la función que mejor ajusta los datos.

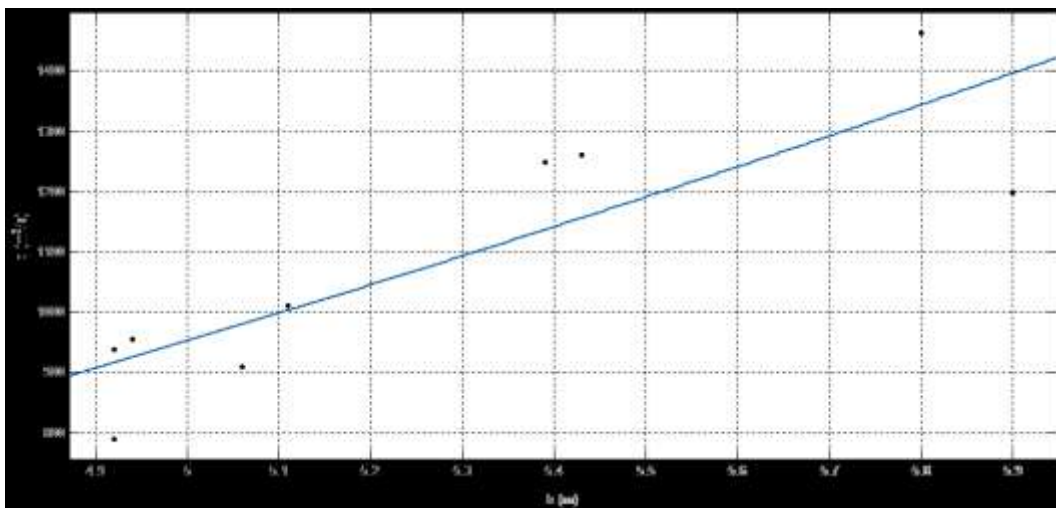


Figura 60.- Curva H-Q para lecturas de escala por encima de los 4,10 m.

$$Q = 118,7 (H - 1,511)^{5/3} \quad R=0,74$$

3.2.2. Estabilidad de la Sección

La erosión general ocurre como consecuencia del aumento de la capacidad del río para transportar sedimentos durante una crecida o como consecuencia de alteraciones antrópicas. Junto con el aumento de nivel consecuencia del aumento de flujo hay un aumento en la velocidad y en la tensión de corte en el fondo. Se entiende por erosión general transitoria al descenso que experimenta el lecho del río por el aumento del caudal líquido que escurre por el mismo (Farías, 2008).

La erosión general se puede dividir para su estudio en erosión por contracción del cauce resultante en la aceleración del flujo, como por ejemplo en el estrechamiento que produce un puente, por el paso de una crecida, con erosión del lecho en la rama ascendente del hidrograma y relleno en la rama descendente. Otros caso de erosión general pueden incluir el flujo en curvas, estructuras de control variables aguas abajo u otros cambios aguas abajo que resulten en una reducción del nivel del lecho. Hay que distinguir lo que se denomina erosión general (transitoria) de lo que es la degradación a largo término, ya que la primera suele ser cíclica y relacionada a la ocurrencia de eventos de crecida. (García M. H., 2008)

Se ha observado que el lecho de la sección tiende progresivamente a descender a medida que aumenta el caudal y a rellenarse durante el descenso del hidrograma de la crecida. Este fenómeno es característico de las corrientes efímeras y de los ríos en zonas semiáridas. La profundidad media del lecho del río en una sección depende no sólo del caudal sino que también están íntimamente relacionado con los cambios en el ancho, profundidad, velocidad y carga de sedimento durante el paso de la crecida. Cada uno de estos parámetros presenta histéresis, de manera tal que la rama ascendente del hidrograma se caracteriza por una mayor carga de sedimento una mayor velocidad y una menor profundidad que para el mismo caudal en la rama descendente del hidrograma. De manera similar, el máximo descenso del fondo no se corresponde necesariamente con el paso del máximo caudal de la crecida (Leopold, Wolman, & Miller, 1995).

En el Pilcomayo durante el paso de la crecida la sección transversal se incrementa no solo por el incremento del nivel de la superficie de agua sino también por el aumento de la profundidad, que llega hasta los 4 metros en la sección de MLP, por la remoción de material de fondo arrastrado por la corriente. Esta profundización no ocurre solamente en algún punto localizado del lecho sino que se desencadena un proceso de socavación general por el paso de los sedimentos de fondo a integrar la carga en suspensión. Estos fenómenos observados en el Río Pilcomayo son particulares del mismo, no detectándose en otros cauces de agua, en los cuales las modificaciones de las formas de fondo no adquieren semejante magnitud (Kopaliani & Georgievsky, 1993).

La Figura 61 muestra la gran variación de la sección durante aforos diarios en Misión La Paz en enero de 2014 y la Figura 62 los niveles registrados. Se observa que la vaguada ha descendido hasta 1,6 m con efectos también de gran movimiento en el resto del lecho.

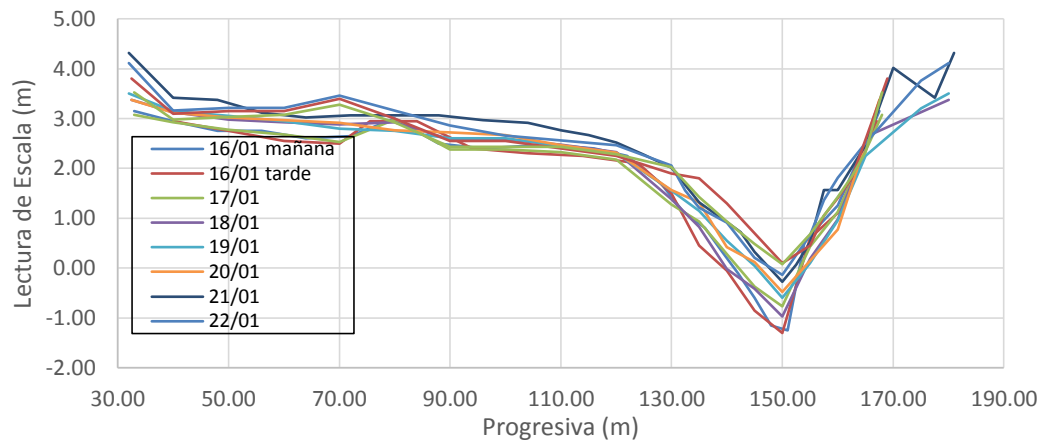


Figura 61.- Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014)

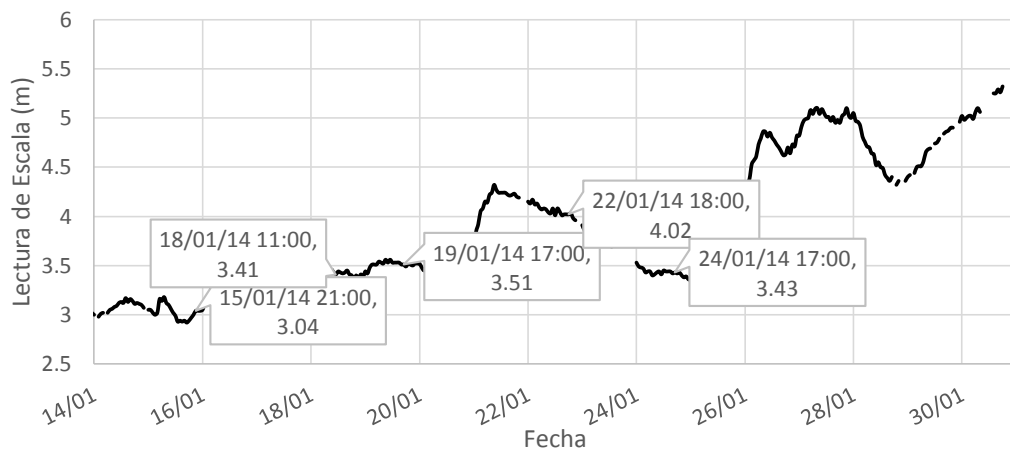


Figura 62.- Niveles durante los aforos 2014 en MLP. (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014)

De manera simplificada, se puede estimar la profundidad del fondo para una determinada descarga si se conocen el tirante y la pendiente de la superficie de agua se puede aproximar la velocidad media y el área transversal para esta descarga. Muchos ríos, en especial los que fluyen sobre gravas, tienen la tendencia de desarrollar canales localizados y también suelen presentar bancos móviles que pueden producir por lo menos bifurcaciones parciales y canales preferenciales de circulación en caudales bajos que contribuyen a marcadas irregularidades para caudales altos (Raudkivi & Breusers, 1991). El Pilcomayo si bien tiene una granulometría correspondiente a arenas finas limosas en Misión La Paz presenta este tipo de canalizaciones (Figura 63).

A partir de las planillas de aforo del periodo comprendido entre 10 de enero de 2013 y el 30 de enero de 2013 del Río Pilcomayo en la sección de Misión La Paz, se obtuvieron cotas relativas a la lectura de escala, tanto de la superficie de agua como del fondo, obteniéndose así la variación del perfil de la sección durante la crecida.

A continuación se muestran las secciones para diferentes fechas y sus correspondientes lecturas de superficie de agua, estas se indican con el mismo símbolo que el fondo pero con un tono de color más claro.

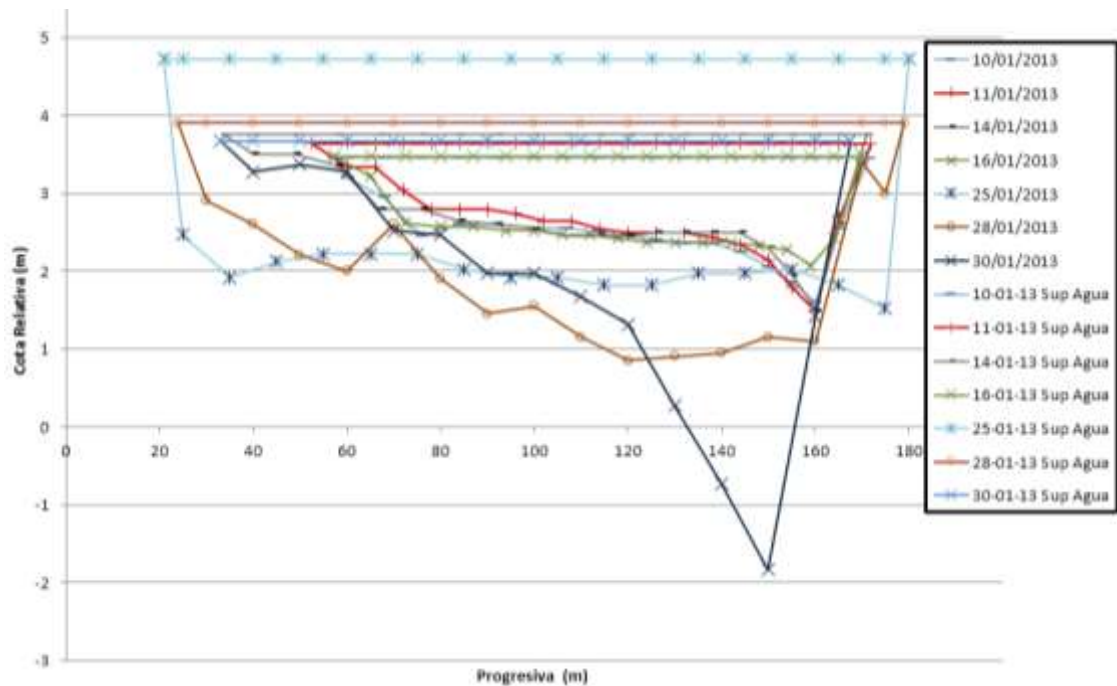


Figura 63.- Lecho y superficie de Agua medidos en el Río Pilcomayo en la Sección misión la Paz, enero 2013.

Se buscó una función que vincule los caudales aforados y los caudales específicos, encontrándose una muy buena relación lineal (Figura 64).

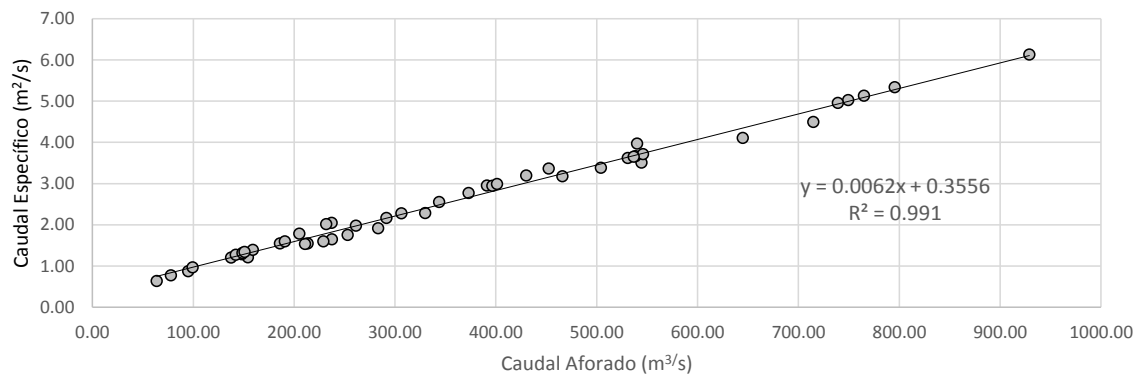


Figura 64.- Relación entre Caudal y Caudal Específico

Hay diferentes formulaciones empíricas que se utilizan para determinar la erosión generalizada transitoria en el lecho de ríos como son las propuestas por Lischtván – Lebediev (1959), Laursen (1960), Blench (1969), Mazza – Echeverría (1973) y Kopalani y Giorogievsky (1993). Ninguna de estas fórmulas se aproxima a los valores aforados. Estas fórmulas tienen la forma $h_s = c_0 q^{c_1} d^{c_2}$. Se utilizó un $d_{50} = 0,20$ mm que es el sedimento medio del lecho en Misión La Paz para aguas altas (CTN - CCE, 1997).

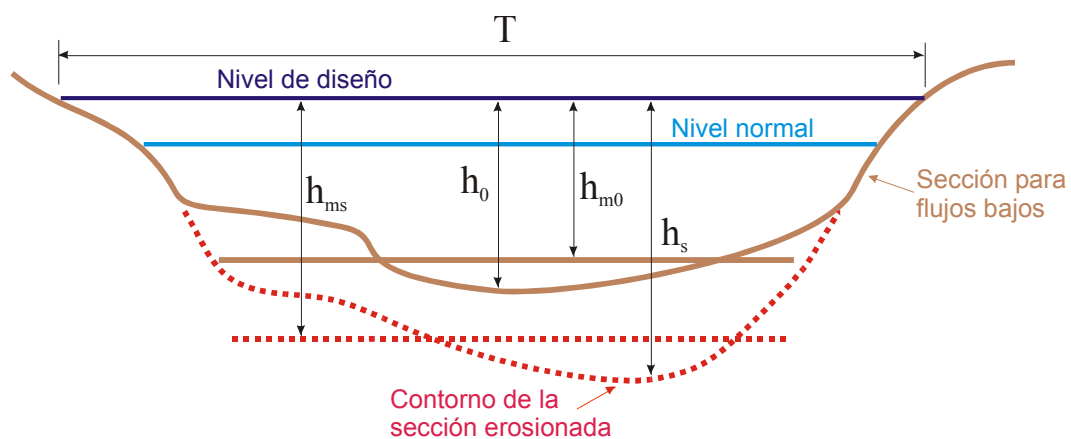


Figura 65.- Elementos característicos de una sección considerados para el cálculo de la erosión potencial generalizada transitoria (Farías, 2011).

Tabla 6.- Coeficientes para las formulaciones de Erosión generalizada transitoria (Farías, 2011).

Formula	c_0	c_1	c_2
Lischvan-Lebediev	0.333	0.710	0.199
Laursen	0.205	0.660	0.284
Blench	0.380	0.667	0.167
Maza A. - García F.	0.209	0.670	0.305
Maza A. - Echavarria A.	0.365	0.784	0.157
Kellerhals	0.470	0.800	0.120

4. Hidrología del tramo en estudio

4.1. Curvas Q-D-T

Con el objetivo de analizar la magnitud relativa de los diferentes eventos de crecida (hidrogramas) del Río Pilcomayo se ha planteado la necesidad de determinar la recurrencia de estos eventos. Se ha optado por calcular la recurrencia de los caudales a partir de los caudales medios diarios proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación para la estación de Misión La Paz y de los caudales medios diarios proporcionados por SENHAMHI (Bolivia) vía la Dirección Ejecutiva para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo para la estación de Villamontes.

4.1.1. Estación Misión La Paz, Argentina.

En base a una serie histórica de caudales en Misión La Paz, proporcionada por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación, de libre disponibilidad en su sitio web <http://www.hidricosargentina.gov.ar>, se realizó una curva Q-d-T (caudal, duración y recurrencia).

Se contó con una serie de caudales diarios, desde el primero de enero de 1960 hasta el 31 de agosto de 2011. Se dividen las mediciones en años hidrológicos, desde 1 septiembre a 31 de agosto de cada año.

El procedimiento consiste en tomar para cada año el mayor caudal medio ocurrido para cada duración en días (de 1 a 10 días). Es decir, para dos días se toma el promedio de los caudales diarios de ese día y del día posterior.

Tabla 7.- Caudales máximos medios anuales para duración de: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 10 días.

Año Hidrológico	Duración							
	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5	d=6	d=7	d=10
1960	763	738	681	636	619	599	586	556
1961	840	814	793	765	744	726	696	623
1962	1672	1460	1452	1454	1443	1436	1431	1357
1963	902	847	724	669	668	648	633	648
1964	963	943	904	835	777	721	716	699
1965	922	811	717	643	568	517	472	459
1966	1240	1134	1063	1004	932	867	818	728
1967	1969	1964	1784	1680	1603	1561	1523	1435
1968	886	842	853	784	751	751	759	673
1969	1715	1537	1351	1182	1122	1137	1086	908
1970	1676	1662	1519	1427	1341	1331	1286	1246
1971	1144	1060	988	900	827	796	780	714
1972	1361	1173	1016	924	904	870	823	716
1973	2290	2200	2149	2138	2125	2022	1933	1904
1974	2032	1874	1793	1720	1720	1703	1622	1530
1975	1623	1539	1470	1399	1379	1371	1362	1173
1976	1218	1187	1116	1010	1013	1009	984	924
1977	2103	2004	1892	1850	1789	1729	1659	1465
1978	3781	3609	3487	3284	3056	2899	2739	2454
1979	1817	1588	1475	1434	1448	1400	1304	1094
1980	1868	1776	1723	1615	1544	1502	1489	1459
1981	3589	2955	2709	2431	2371	2314	2291	1987
1982	499	495	438	416	397	378	351	313
1983	4585	4570	4187	3936	3669	3531	3425	3067
1984	3489	3283	3082	2969	2812	2617	2438	2277
1985	3295	3086	2850	2694	2554	2425	2306	2087
1986	2366	2277	2125	2042	2078	2082	2043	1866
1987	2465	2369	2316	2237	2141	2052	1974	1786
1988	1086	892	841	819	729	667	635	563
1989	738	657	629	601	569	555	536	510

Año Hidrológico	Duración							
	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5	d=6	d=7	d=10
1990	1799	1695	1588	1535	1566	1534	1468	1264
1991	1927	1784	1567	1453	1389	1333	1286	1147
1992	1561	1444	1286	1119	968	885	829	775
1993	1081	1010	911	877	850	837	788	717
1994	1342	1245	1199	1132	1082	1003	942	787
1995	965	723	606	553	518	507	508	471
1996	2374	2303	2135	1983	1850	1766	1680	1608
1997	617	601	532	474	428	399	409	376
1998	2079	1949	1823	1749	1684	1600	1520	1396
1999	1786	1700	1609	1555	1506	1469	1403	1262
2000	2215	2035	1874	1756	1698	1609	1548	1427
2001	1579	1519	1377	1361	1308	1246	1172	974
2002	2089	1838	1538	1313	1206	1200	1189	1008
2003	2459	2112	1799	1565	1437	1392	1361	1118
2004	2973	2653	2250	1982	1772	1600	1454	1316
2005	2539	2350	2140	2025	2065	2008	1966	1887
2006	3009	2976	2659	2373	2150	2045	1902	1586
2007	2867	2857	2705	2584	2407	2255	2254	2136
2008	2265	2163	1931	1788	1688	1687	1673	1540
2009	2607	2330	2208	2152	2115	1998	1871	1592
2010	2151	1950	1899	1818	1727	1624	1521	1441

Una vez obtenida la tabla con los caudales medios máximos anuales se procede al análisis estadístico de los datos previa verificación de independencia y homogeneidad. Se utilizaron las curvas de probabilidades de Gumbel y Log-Pearson tipo III para un intervalo de confianza del 95%.

A continuación se resumen los resultados para un día de duración (Tabla 8 y Tabla 9)

Tabla 8.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Gumbel.

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza (95%)
Años	m³/s	m³/s	m³/s
100	4840	417	4020 - 5650
50	4330	362	3620 - 5040
20	3650	291	3080 - 4220
10	3130	237	2660 - 3590
5	2580	184	2220 - 2940
3	2150	147	1860 - 2430
2	1750	119	1520 - 1990

Tabla 9.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en MLP, Curva de Probabilidad Log-Pearson III.

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza (95%)
Años	m³/s	m³/s	m³/s
100	4690	716	3290 - 6100
50	4250	531	3210 - 5290
20	3630	344	2950 - 4300
10	3130	249	2640 - 3620
5	2590	190	2220 - 2960
3	2150	157	1840 - 2460
2	1750	132	1490 - 2010

De igual forma se procedió para diferentes duraciones obteniéndose el gráfico presentado en la Figura 66.

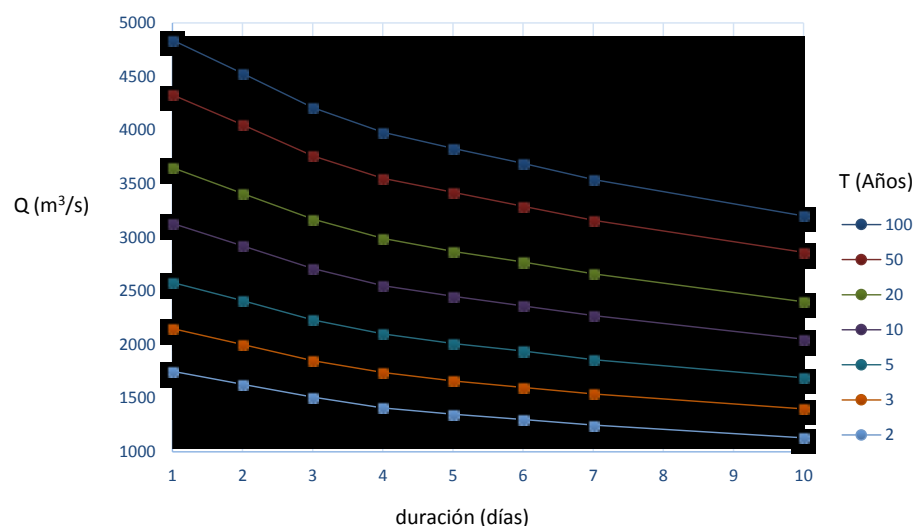


Figura 66.- Curvas QDT para Misión La Paz, Curvas de Probabilidades Gumbel.

La función Potencial que representa la relación entre las 3 variables, con cuatro parámetros de ajuste es:

$$Q(D, T) = 37520 \frac{T^{0,1465}}{(D + 14,67)^{1,022}}$$

$$T = \left(\frac{Q \cdot (D + 14,67)^{1,022}}{37520} \right)^{6,8259}$$

Como ejemplo de una de las aplicaciones de este gráfico se analiza la crecida de enero 2013, con los siguientes datos en MLP.

Tabla 10.- Ejemplo de utilización de las curvas para el caso de la crecida del año 2013

Fecha	Altura promedio diaria (m)	Caudal medio diario(m3/seg)
17/01/2013	3.94	295
18/01/2013	5.26	1116
19/01/2013	5.05	948
20/01/2013	5.83	1648
21/01/2013	6.23	2098
22/01/2013	6.52	2447
23/01/2013	6.61	2564
24/01/2013	5.83	1655
25/01/2013	4.57	610
26/01/2013	4.36	493
27/01/2013	3.99	312

Para el Pico 2564 m³/s, con 1 día de duración, corresponde un periodo de retorno de 7 años. Si tomamos 6 días de duración desde el 19 de enero, con un caudal promedio de 1893 m³/s obtenemos un periodo de retorno, en este caso, también de 7 años.

4.1.2. Estación Villamontes, Bolivia.

La Tabla 11 presenta el mayor caudal medio diario ocurrido para cada duración en días (de 1 a 10 días). Es decir, para dos días se toma el promedio de los caudales diarios de ese día y del día posterior.

Tabla 11.- Caudales medios diarios máximos anuales para diferentes duraciones

Año Hidrológico	Duración							
	d=1	d=2	d=3	d=4	d=5	d=6	d=7	d=10
1973	49	46	45	44	43	42	42	41
1974	4129	3451	3235	3274	3129	3012	2828	2663
1975	3390	3096	2788	2744	2763	2692	2556	2307
1976	2089	1999	1870	1752	1693	1715	1599	1346
1977	1263	1231	1131	1069	1037	987	942	875
1978	4129	3601	3374	3200	3111	2957	2756	2256
1979	8757	7800	6719	6143	5505	4972	4582	3801
1980	1909	1671	1503	1457	1403	1359	1318	1102
1981	2261	2032	1917	1863	1825	1772	1728	1653
1982	4372	4094	3503	3142	3011	2896	2787	2340
1983	567	532	506	467	451	432	406	352
1984	11838	10430	9049	8316	7436	6683	6160	5142
1985	4372	3316	3138	3043	2956	2828	2763	2751
1987	4011	3441	3251	3214	3152	3105	3032	2666
1988	48	126	439	544	553	531	506	438
1989	1105	961	837	733	668	632	602	499
1990	634	600	580	554	520	509	513	418
1991	3282	2300	2090	1946	1858	1830	1750	1487
1992	4149	3112	2698	2423	2268	2151	2040	1700
1993	2628	2036	1835	1590	1428	1284	1173	1002
1994	2160	1477	1247	1154	1081	1014	960	839
1995	1790	1771	1739	1631	1566	1445	1339	1140
1996	787	762	683	633	585	566	560	524
1997	5782	4996	4454	4067	3748	3478	3412	3207
1998	1075	1035	961	893	829	772	749	677
1999	11237	8800	7955	6595	5743	5156	4671	3890
2000	4454	4312	3905	3369	3086	2931	2997	2823
2001	5877	5531	4527	3900	3566	3272	3033	2772
2002	2426	2264	2119	1992	1907	1790	1694	1394
2003	2871	2205	1805	1573	1388	1287	1267	1265
2004	4648	3161	2644	2343	2072	1863	1711	1355
2005	5412	4843	3809	3138	2691	2364	2103	1681
2006	4797	3750	3036	2719	2676	2681	2521	2257
2007	10538	8218	6661	5324	4535	4037	3648	2906
2008	3808	3157	2862	2665	2447	2293	2177	2079
2009	2681	2299	2013	1830	1684	1615	1658	1517
2010	3598	2915	2548	2292	2280	2121	1979	1659
2011	2992	2171	1825	1763	1680	1583	1484	1269
2012	2409	2279	2013	1878	1949	1871	1793	1492
2013	4947	4158	3870	3668	3294	2970	2695	2147
2014	3821	3576	3230	2981	2791	2609	2416	2029
2015	2121	2043	2011	1928	1849	1689	1546	1265
2016	1159	869	763	688	666	699	682	612

Una vez obtenida la tabla con los caudales medios máximos anuales se procede al análisis estadístico de los datos previa verificación de independencia y homogeneidad. Se utilizaron las curvas de probabilidades de Gumbel y Log-Pearson tipo III.

La Tabla 14 presenta los resultados de la curva de probabilidad Gumbel para un día de duración para un intervalo de confianza del 95%.

Tabla 12.- Recurrencia de Caudales para un día de duración en VM, Curva de Probabilidad Gumbel.

T	Q	Desviación	Intervalo de confianza (95%)
Años	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
100	11100	9220	8030
50	9880	8210	7160
20	8250	6870	6000
10	6980	5830	5100
5	5660	4740	4170
3	4610	3880	3420
2	3670	3110	2750

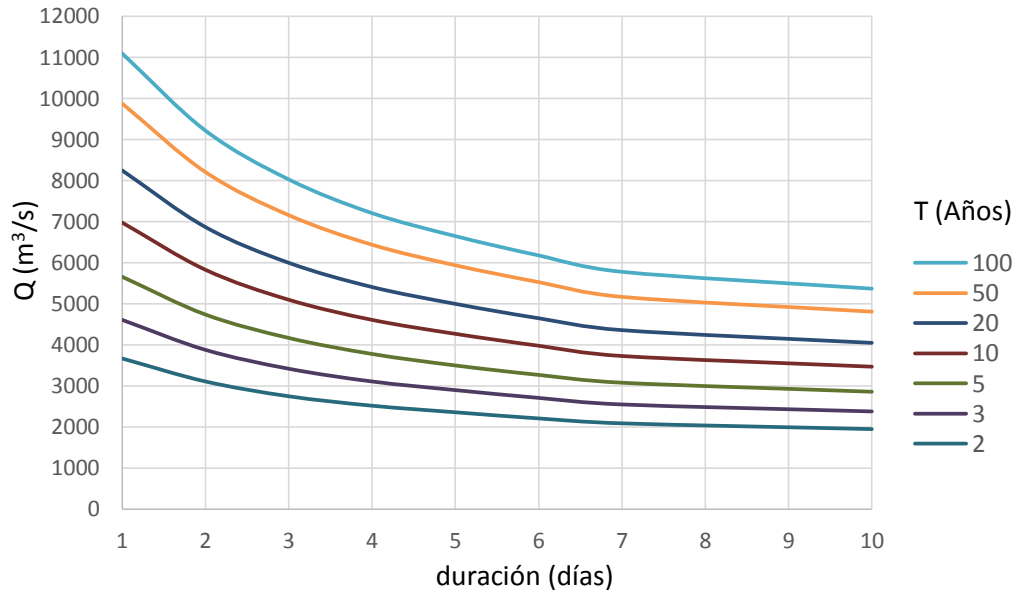


Figura 67.- Curvas QDT para Villamontes, Curvas de Probabilidades Gumbel.

$$Q(d, T) = 6857 \frac{T^{0,1387}}{(d + 0,6452)^{0,4192}}$$

$$T(Q, d) = \left(\frac{Q \cdot (d + 0,6452)^{0,4192}}{6857} \right)^{7,2098}$$

4.2. Curva de Probabilidad de Excedencia de Caudales

También se calcularon las curvas de probabilidad de excedencia de caudales para las estaciones de Villamontes y Misión La Paz (Díaz & Testa Tacchino, 2014). Ésta grafica resulta interesante porque nos permitirá analizar los caudales desbordados. En la Figura 69 se observa que hay pérdidas del orden de 15 m³/s entre VM y MLP con una excedencia superior al 3 %, que nos indicaría las perdidas por evapotranspiración. Al disminuir la probabilidad de excedencia la diferencia entre curvas aumenta, pudiendo indicar pérdidas por infiltración para caudales en épocas de aguas altas. Las primeras pérdidas por desbordes de moderada magnitud ocurren para caudales de 2551 m³/s en VM y de 2100 m³/s en MLP. Caudales de 3817 m³/s en VM y 2613 m³/s en MLP, con una probabilidad de excedencia de 2 ‰, producen grandes desbordes de aproximadamente 800 m³/s. Estos valores parecerían ser congruentes con los que se observaron a partir del análisis con imágenes satelitales cuando están activos los cuatro desbordes mencionados (Ver Sección 6). Para caudales de 5400 m³/s en VM y 3200 m³/s en MLP, se acrecentaría notablemente el caudal desbordado.

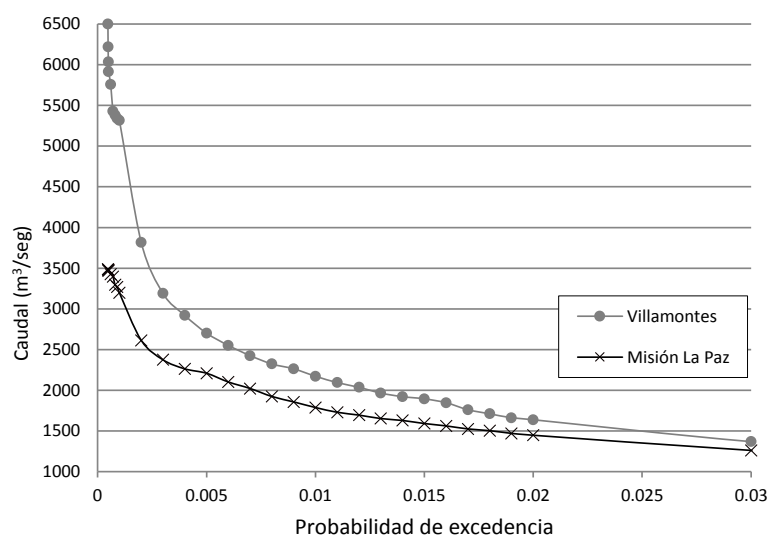


Figura 68.- Curvas de Excedencia para VM y MLP.

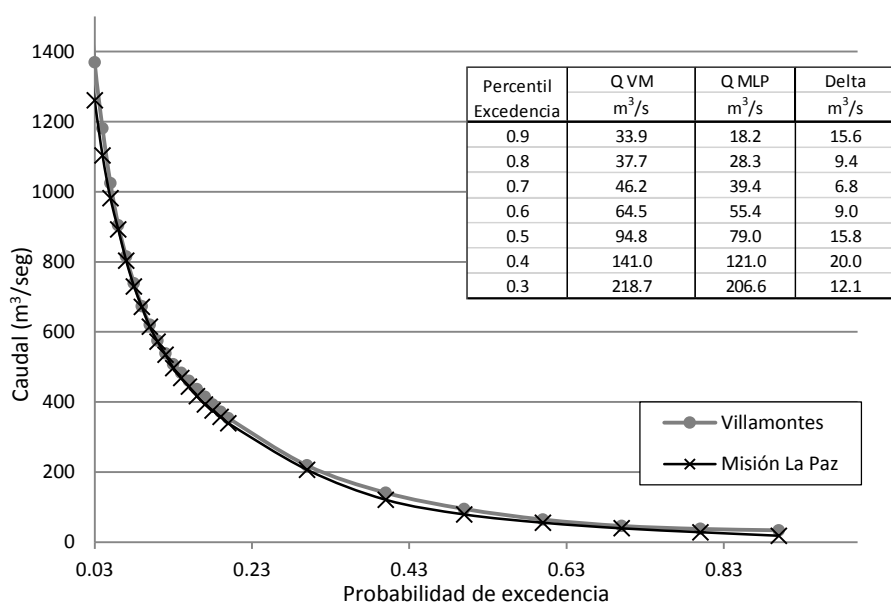


Figura 69.- Curvas de Excedencia para VM y MLP.

4.3. Correlación Niño/Niña con Crecidas/Sequias

Los indicadores macroclimáticos y astronómicos analizados en este apartado son los siguientes:

- Niño 3.4: Temperatura Promedio de la superficie del mar en las regiones NIÑO 3 y NIÑO 4
- Niño 1+2: Temperatura Promedio de la superficie del mar en las regiones 1+2

Para una mayor comprensión de cómo se desarrollan los eventos El Niño/La Niña del ciclo ENOS a lo largo del Océano Pacífico Ecuatorial, se han definido cuatro regiones de acción. De Oeste a Este estas regiones son: Regiones Niño 4, Niño 3, Niño 3.4 y Región Niño 1+2 (Figura 70).

Las regiones Niño 4 y 3 se encuentran ubicadas en el lado occidental del Pacífico y se caracterizan por presentar las máximas anomalías de temperatura superficial del mar.

La región Niño 3.4 es una subregión comprendida entre las regiones Niño 4 y 3 y representa un buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el Índice de Oscilación del Sur.

La región Niño 1+2 incluye las costas de Perú y Ecuador incluidas las Islas Galápagos, ésta región representa un indicador de los cambios inducidos por El Niño en los patrones de variabilidad de la costa del Pacífico de América del Sur (Díaz, 2016).

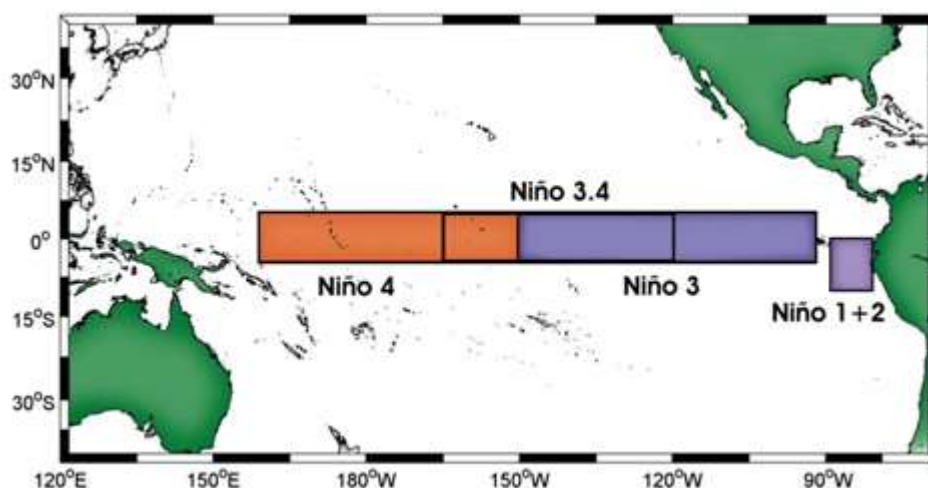


Figura 70.- Ubicación de las regiones ENOS

Fuente: http://www.inocar.mil.ec/modelamiento/el_nino/nino_generalidades.php

4.3.1. Análisis de frecuencias dominantes en caudales

En el siguiente análisis se pretende identificar las frecuencias dominantes en las series de caudales de la estación Misión La Paz del Río Pilcomayo a través del análisis del espectro de energía de las fluctuaciones observadas en las series de caudales.

El análisis del espectro de energía puede ser valiosa en los estudios que implican ondas u oscilaciones cuasi periódicas en una serie de datos. El espectro de energía transforma la señal (caudales) originalmente en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante una transformada rápida de Fourier (Díaz, 2016)

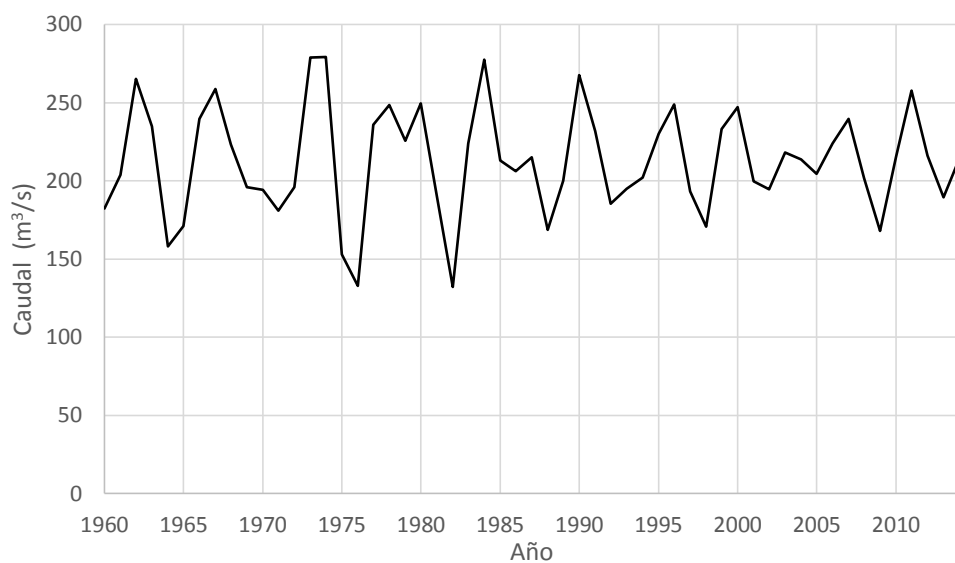


Figura 71.- Serie de Caudales medios anuales

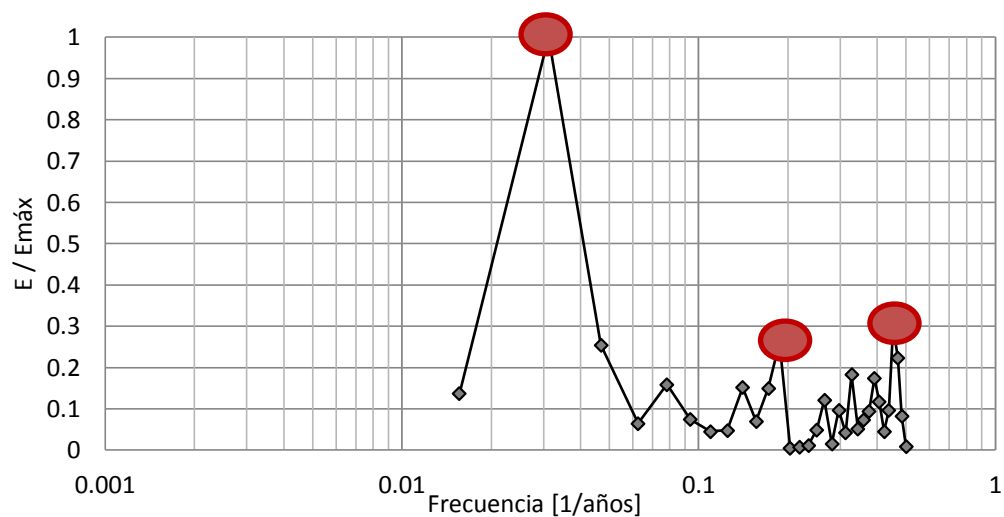


Figura 72.- Espectro de energía de las fluctuaciones de los caudales indicándose las tres frecuencias dominantes

Tabla 13.- Resumen de las tres frecuencias dominantes y sus correspondiente periodo.

Frecuencia dominante (1/años)	Periodo (T) (años)
0.031	32
0.453	2.2
0.187	5.3

4.3.2. Niño 1+2

4.3.2.1. Periodo 3-7

En este apartado se comparan las series de caudales e indicador niño 1+2 filtradas y para un periodo entre 3 y 7 años (1/3 años y 1/7 años de frecuencia) y normalizadas. La correlación encontrada es (-0,46), es decir correlación negativa.

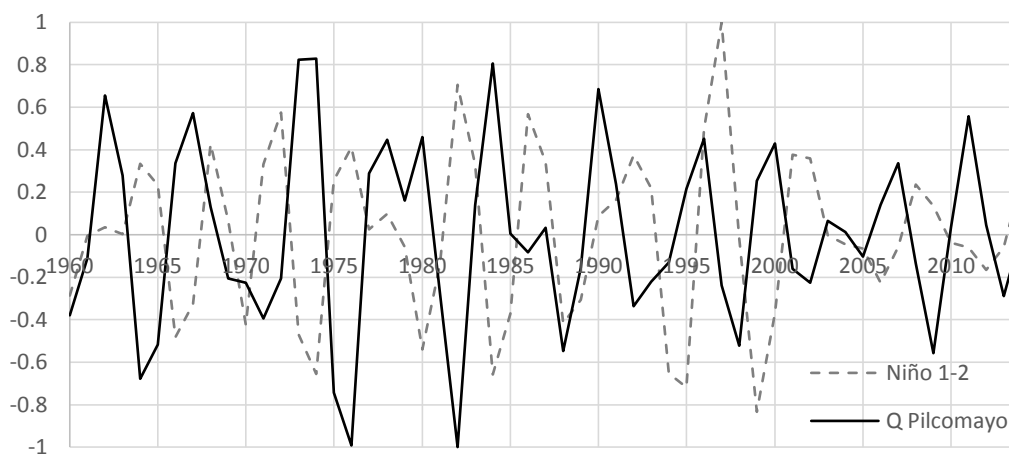


Figura 73.- Caudal e indicador Niño 1+2 filtrados con un filtro pasabanda entre 3 y 7 años.

4.3.2.2. Periodo 4-6

En este apartado se comparan las series de caudales e indicador niño 1+2 filtradas para un periodo entre 4 y 6 años (1/4 años y 1/6 años de frecuencia) y normalizadas. La correlación encontrada es (-0,30), es decir correlación negativa.

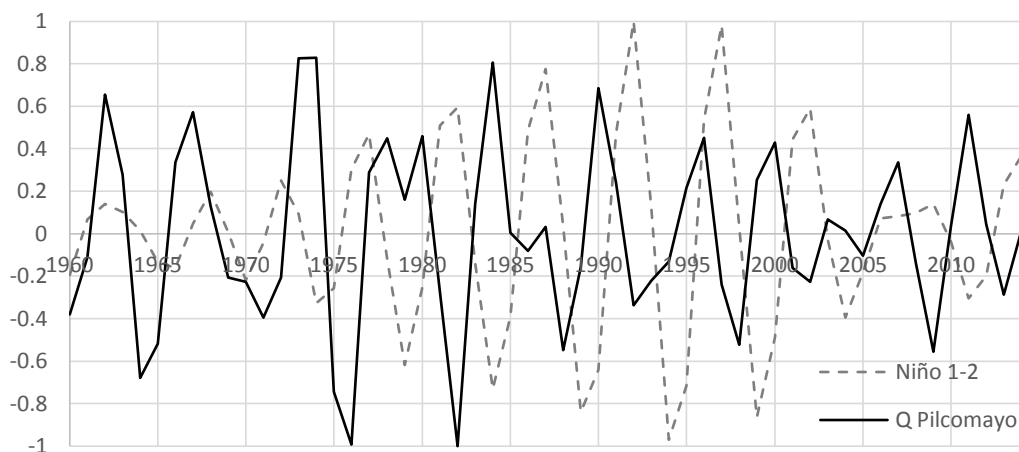


Figura 74.- Caudal e indicador Niño 1+2 filtrados con un filtro pasabanda entre 4 y 6 años.

4.3.3. Niño 3.4

4.3.3.1. Periodo 3-7

En este apartado se comparan las series de caudales e indicador niño 1+2 filtradas para un periodo entre 3 y 7 años (1/3 años y 1/7 años de frecuencia) y normalizadas. La correlación encontrada es (-0,33), es decir correlación negativa.

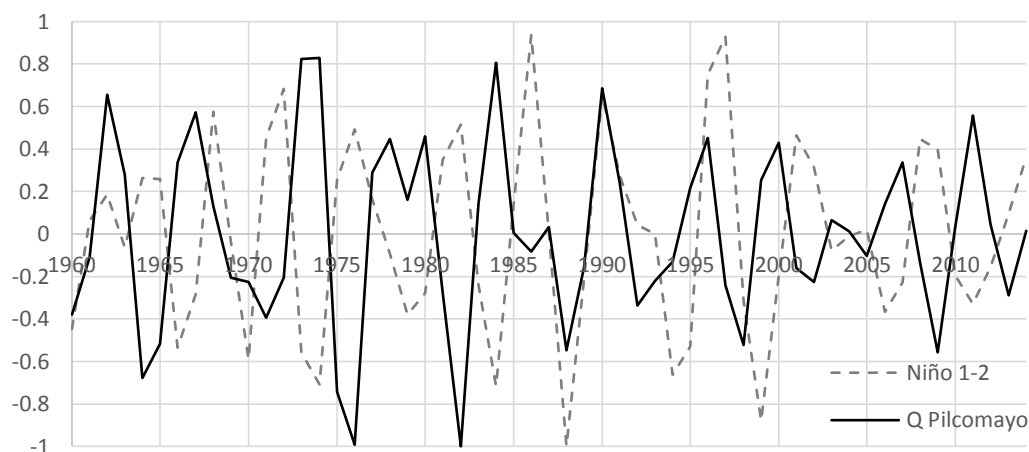


Figura 75.- Caudal e indicador Niño 3.4 filtrados con un filtro pasabanda entre 3 y 7 años.

4.3.3.2. Periodo 4-6

En este apartado se comparan las series de caudales e indicador niño 1+2 filtradas para un periodo entre 4 y 6 años ($1/4$ años y $1/6$ años de frecuencia) y normalizadas. La correlación encontrada es (-0,15), es decir correlación negativa.

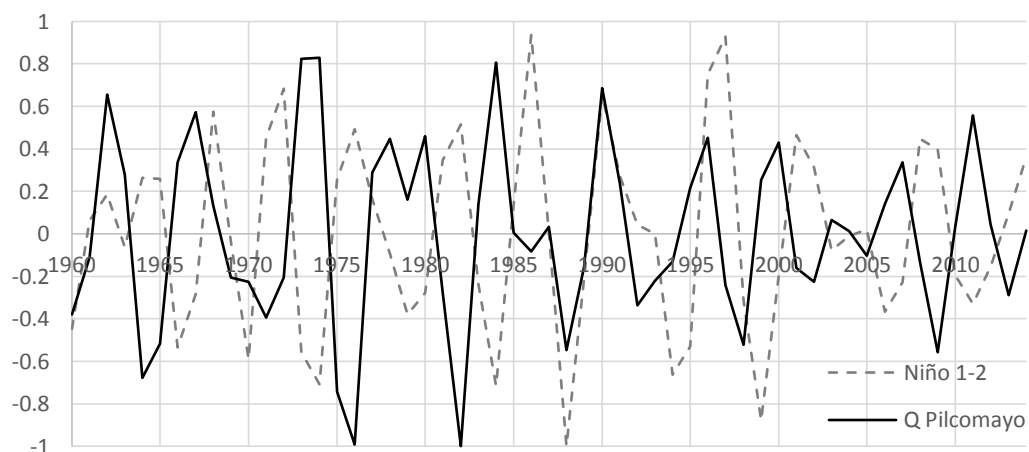


Figura 76.- Caudal e indicador Niño 3.4 filtrados con un filtro pasabanda entre 4 y 6 años.

Los indicadores analizados muestran que la mejor correlación la presenta el indicador niño 1+2 con periodos entre 3 años y 7 años.

4.4. Sedimentos

4.4.1. Granulometría

A continuación se presentan datos obtenidos a partir de diferentes bibliografías consultadas respecto a los tamaños de sedimentos para estaciones del Río Pilcomayo de relevancia para Argentina.

4.4.1.1. Villamontes

En Villamontes la granulometría media del lecho del río es de arena media con diámetros de 0,250 mm a 0,500 mm, aunque existen sedimentos de tamaño de grano más grueso. Las gravas proceden también de los conglomerados de la cuenca alta y de las terrazas fluviales locales Cuaternarias. (Pool & Van Duijne, 1996)

A partir de 12 muestras de material en suspensión se obtuvo el rango de granulometrías para Villamontes. Se obtuvo un D50 de 6,5 μm , arena fina en la clasificación (Wentworth, 1922). Las muestras analizadas poseen un 8,1 % de material grueso y 91,9 % de material fino compuesto por 68,1 % de material limoso y 31,9 % material arcilloso.

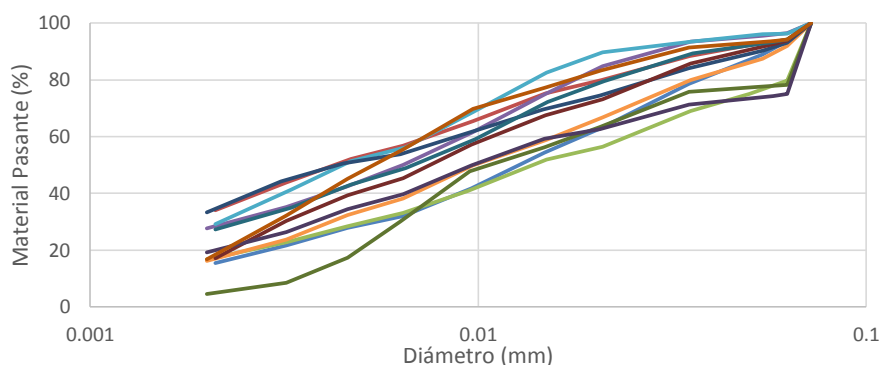


Figura 77.- Rango de curvas granulométrica del material del lecho del río en Villamontes (EVARSA, 2007).

4.4.1.2. Zona de Embocadura

En la zona de la Embocadura, para el material del lecho, se ha encontrado que el D50 es de 1,57 μm , arena muy fina en la clasificación (Wentworth, 1922), con un contenido de limo (partículas menores a 0,062 mm) del 5 % (Pool, Usai, & Baas, 1993).

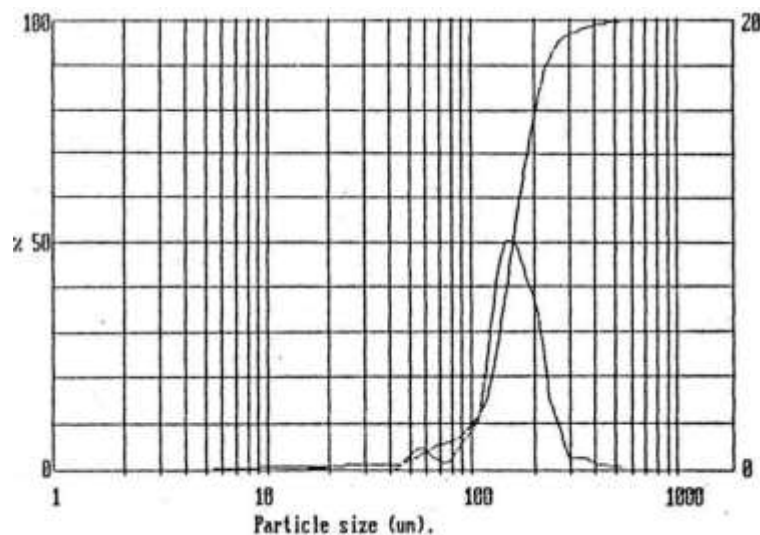


Figura 78.- Curva granulométrica del material del lecho del río en la zona de la embocadura (Pool, Usai, & Baas, 1993).

4.4.1.3. Misión La Paz

A partir de muestras del fondo del río en Misión La Paz (Kopaliani & Georgievsky, 1993) concluyeron que durante el período de aguas bajas el 80-90 % de los sedimentos de fondo tienen dimensiones menores de 0,25 mm de los cuales la mayoría se hallan en la franja 0,10-0,25 mm, en el rango de las arenas finas.

En el período de aguas bajas (baja concentración de material sólido en el río), una gran parte de la composición de la carga de lavado, el 25-30 %, tiene dimensiones mayores de 0,04 mm (limos y arcillas) mientras que durante las crecidas (alta concentración de sedimentos), dichas partículas comprenden solo el 10-20 %.

La Tabla 14 presenta el tamaño de los finos en suspensión según Brea y Spalletti (2011) y la Tabla 15 la granulometría del lecho en el centro del cauce según los mismos autores.

Tabla 14.- Tamaño de Finos en Suspensión, MLP (Brea & Spalletti, 2011).

Clases granulométricas (% en peso) de la fracción arena en suspensión					
Fecha	Muy gruesa	Gruesa	Mediana	Fina	Muy fina
24/07/2008	0,05	0,35	0,75	51,36	47,49
30/10/2008	0,10	0,55	1,22	60,05	38,09
19/02/2009	0,00	0,00	1,80	13,15	85,06

Tabla 15.- Granulometría en Sedimentos de Fondo en el centro del cauce, MLP (Brea & Spalletti, 2011).

Fecha	%Arena	%Limo	%Arcilla
11/02/2008	97,63	2,37	0,00
24/07/2008	69,22	27,36	3,42
30/10/2008	99,43	0,57	0,00
19/10/2008	99,47	0,13	0,00

Orfeo (2012) presenta granulometría en tres verticales que se presentan en la Figura 79. La Tabla 16 presenta el tamaño de finos en suspensión y la Tabla 17 la granulometría en el lecho.

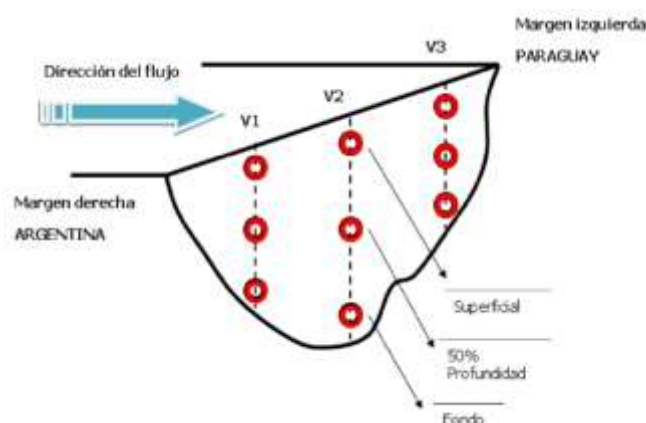


Figura 79.- Secciones de muestreo de granulometría según Orfeo (2012)

Tabla 16.- Tamaño de Finos en Suspensión, en tres verticales, MLP (Orfeo, 2012)

Fecha de muestreo: 14/03/2012	Vertical 1		Vertical 2		Vertical 3	
Frecuencia de tamaño (% en peso)	Arena	Finos	Arena	Finos	Arena	Finos
Profundidad: Superficial	7,72	92,28	1,28	98,72	1,18	98,82
Profundidad: 50% del total	20,52	79,48	42,73	57,27	27,23	72,77
Profundidad: Fondo	23,66	76,34	63,14	36,86	14,29	85,71
PROMEDIO	17,30	82,70	35,72	64,28	14,23	85,77

Tabla 17.- Granulometría en Sedimentos de Fondo en tres verticales, MLP (Orfeo, 2012)

Fecha: 14/03/2012	%Arena	%Limo	%Arcilla
Vertical 1	43,02	27,90	29,07
Vertical 2	98,10	1,24	0,65
Vertical 3	93,57	5,97	0,46
Promedio	78,23	11,71	10,06

4.4.2. Transporte sólido

A partir de datos de aforos líquidos y sólidos proporcionados por la Subsecretaría de Recursos Hídricos se han obtenido las siguientes figuras que explican la relación entre el transporte sólido, dividido en grueso de fondo y fino en suspensión, con el caudal líquido del Río Pilcomayo a la altura de Misión La Paz.

Caudales Líquidos y Sólidos

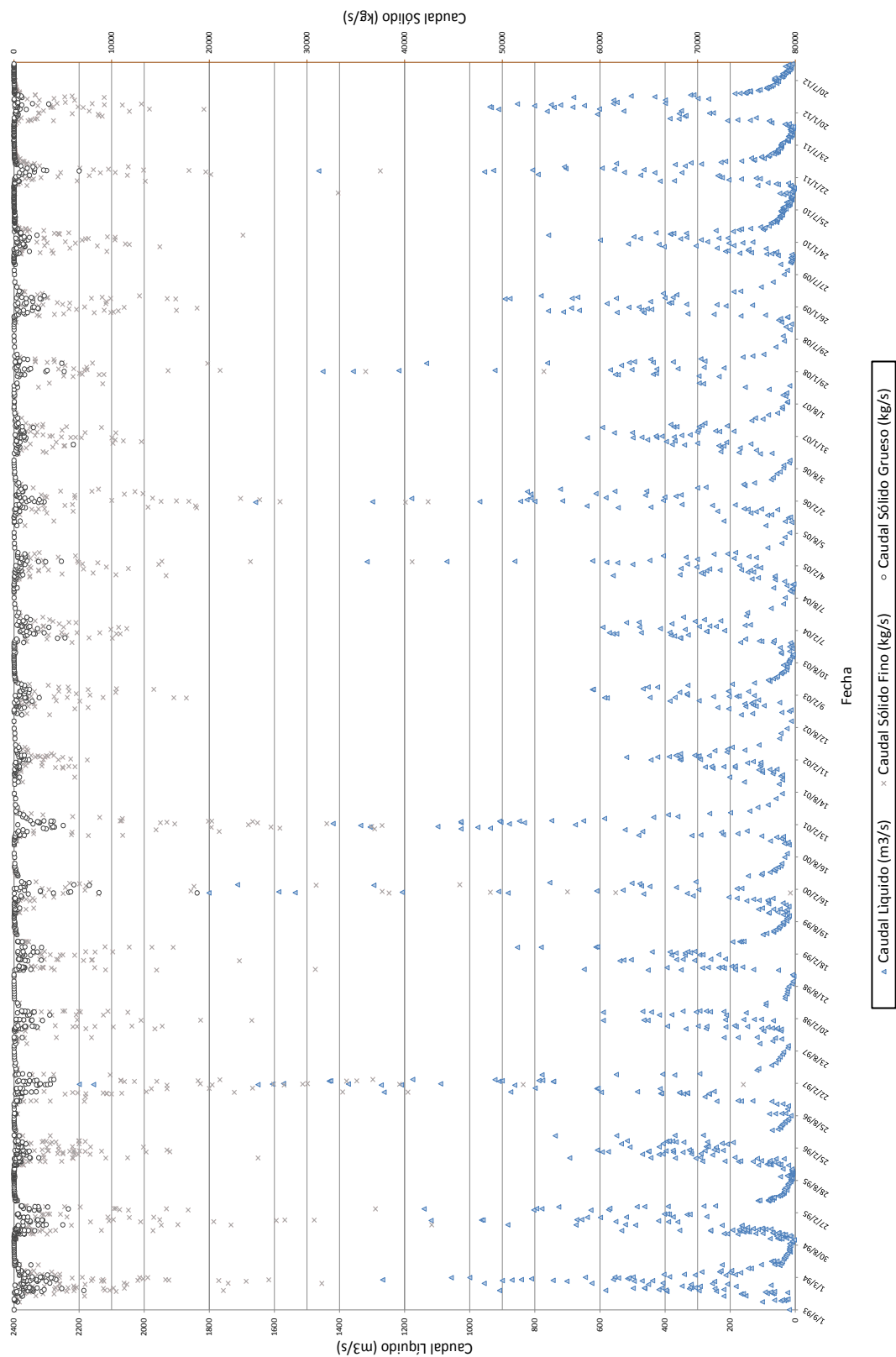


Figura 80.- Series de Caudales Líquidos y Sólidos fino y grueso entre 1993 y 2012

La Figura 81 presenta los valores de caudal sólido de fondo versus caudal líquido obtenidos a partir de aforos. La relación lineal que mejor los representa es

$$Q_{sf} = 2,74 \cdot Q_l - 79,48$$

Siendo Q_{sf} el transporte sólido por el fondo, es decir el material grueso medido en kg/s y Q_l el Caudal líquido en m³/s.

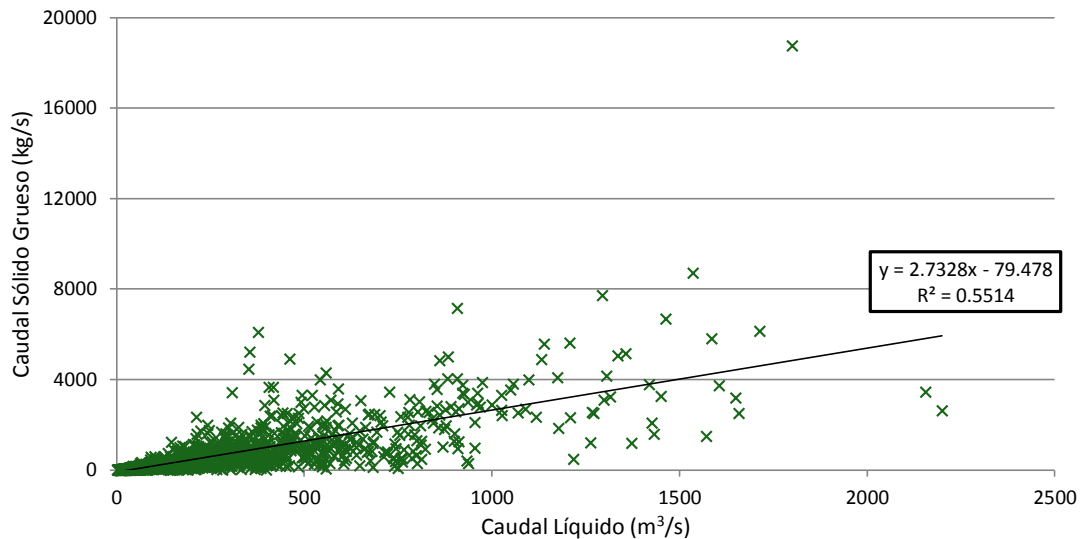


Figura 81.- Relación entre caudal líquido y caudal sólido de fondo o grueso (serie 1993-2014).

En la Figura 82 podemos ver los aforos líquidos y sólidos en suspensión que han sido aproximados por la relación

$$Q_{ss} = 24,15 \cdot Q_l - 1663,6$$

Siendo Q_{ss} el transporte sólido en suspensión o de material fino en kg/s

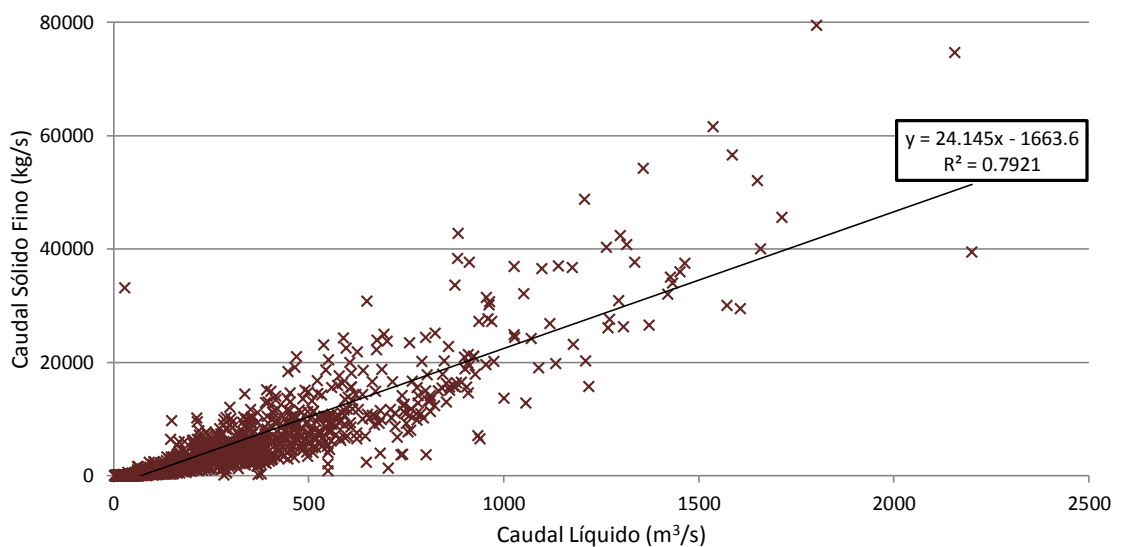


Figura 82.- Relación entre caudal líquido y caudal sólido fino, carga en suspensión (serie 1993-2014).

También se ha representado en la Figura 83 la relación entre transporte sólido de material en suspensión y de fondo, o transporte de finos y gruesos, obteniéndose la siguiente formulación lineal.

$$Q_{ss} = 5,74 \cdot Q_{sf} + 1014,4$$

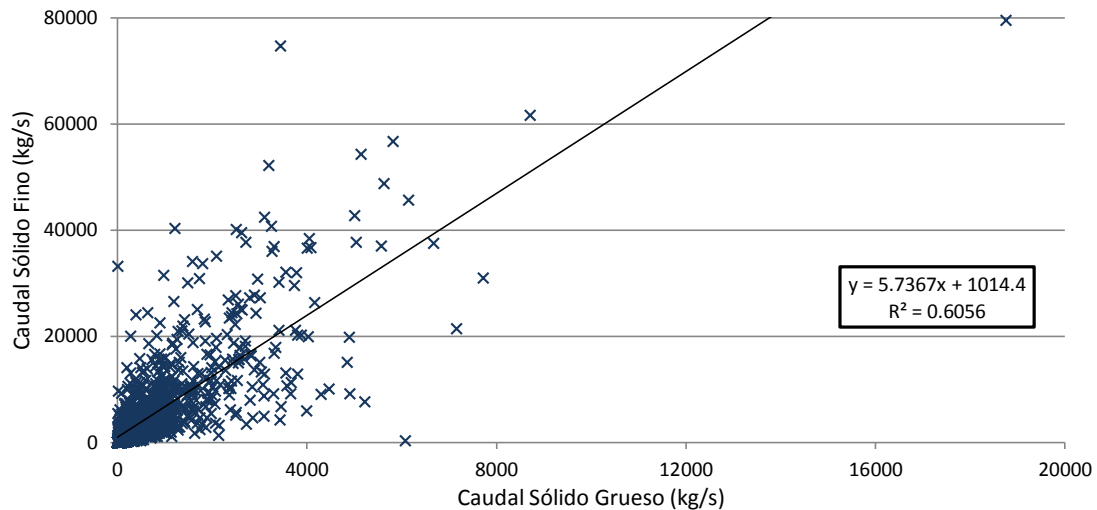


Figura 83.- Relación entre caudal sólido grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).

En la Figura 84 se presentan las relaciones entre caudal de material en suspensión y de fondo vs caudal líquido y en la Figura 85 la relación con el caudal sólido total.

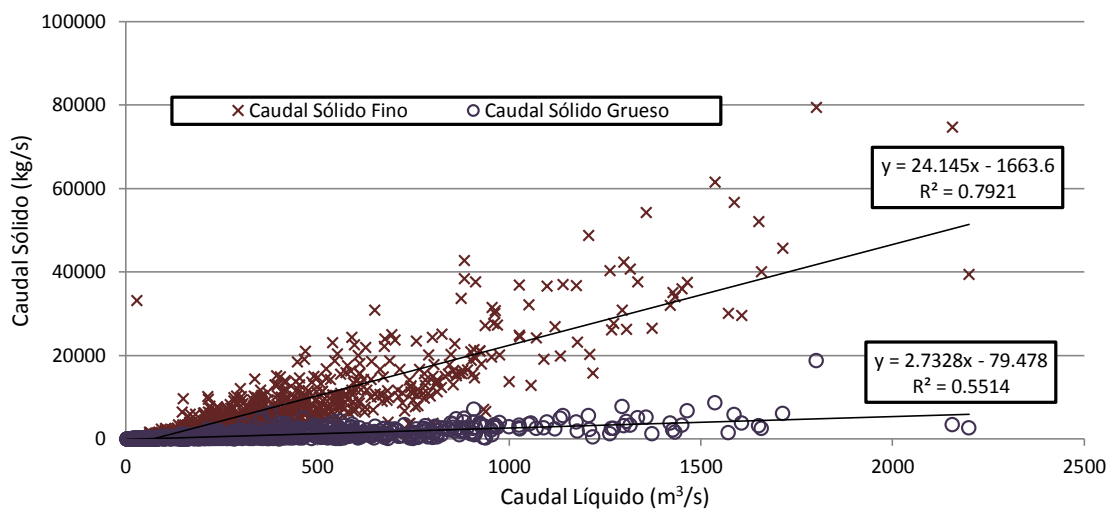


Figura 84.- Relación entre caudal líquido y caudales sólidos grueso de fondo y fino en suspensión (serie 1993-2014).

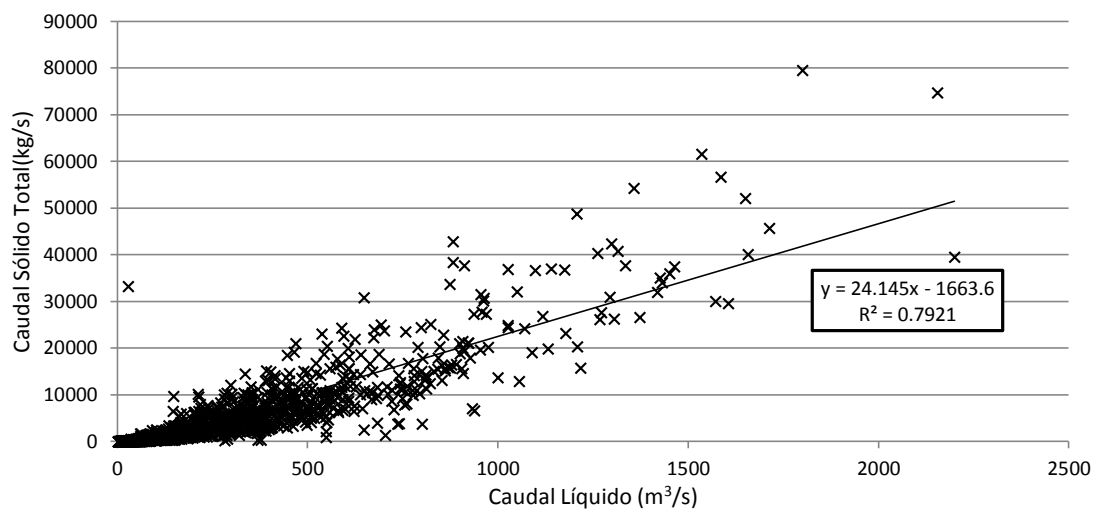


Figura 85.- Relación entre caudal líquido y caudal sólido total (serie 1993-2014).

5. Antecedentes de campo

Se ha participado en 3 campañas de la DE-CTN a la región del Pilcomayo con los objetivos de reconocer el terreno, observar y relevar las zonas de desbordes. Además se han realizado aforos con Molinete en la zona de embocadura, en Misión La Paz y Villamontes. Se realizaron también aforos con flotadores en Misión La Paz y Villamontes, además de filmaciones para obtener velocidades superficiales por seguimiento de partículas y prueba de equipos perfiladores Doppler (ADCP).

Con el fin de hacer más ágil la lectura, el detalle de las campañas y sus resultados se presentan en el Anexo II. Aquí se presentan sólo los puntos principales de cada una.

5.1. Primera Campaña

Se reconocieron los puntos de desbordes aguas arriba de Misión la Paz, el taponamiento en el canal argentino en la zona de “La Embocadura” y se visitaron localidades afectadas por los desbordes y las estaciones de aforo de Misión La Paz y Villamontes.



Figura 86.- Canal Las Torres y taponamiento del cauce seco argentino, septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi, & Testa Tacchino, 2013)



Figura 87.- Defensa de D'Orbigny (Bolivia) septiembre 2013 (Baldissone, Cristanchi, & Testa Tacchino, 2013)

5.2. Segunda Campaña

Se recorrió la zona de desbordes conocido como “Las Vertientes” aguas abajo de Misión La Paz y las localidades afectadas.



Figura 88.- Defensa en Las Vertientes, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).

Se acompañó al personal técnico de Misión La Paz y Villamontes durante sus tareas de aforo y lectura de escala para observar sus métodos y proponer mejoras. Además se probaron diferentes técnicas de aforo: Aforo tradicional con molinete desde vagoneta (Figura 89), aforo por seguimiento de partículas a gran escala por video (Figura 90 y Figura 91) y aforo con flotadores. Estos dos últimos métodos con el fin de probar técnicas de medición que se puedan aplicar durante crecidas.



Figura 89.- Aforo con Moliente sobre vagoneta. Sección MLP, enero 2014 (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).

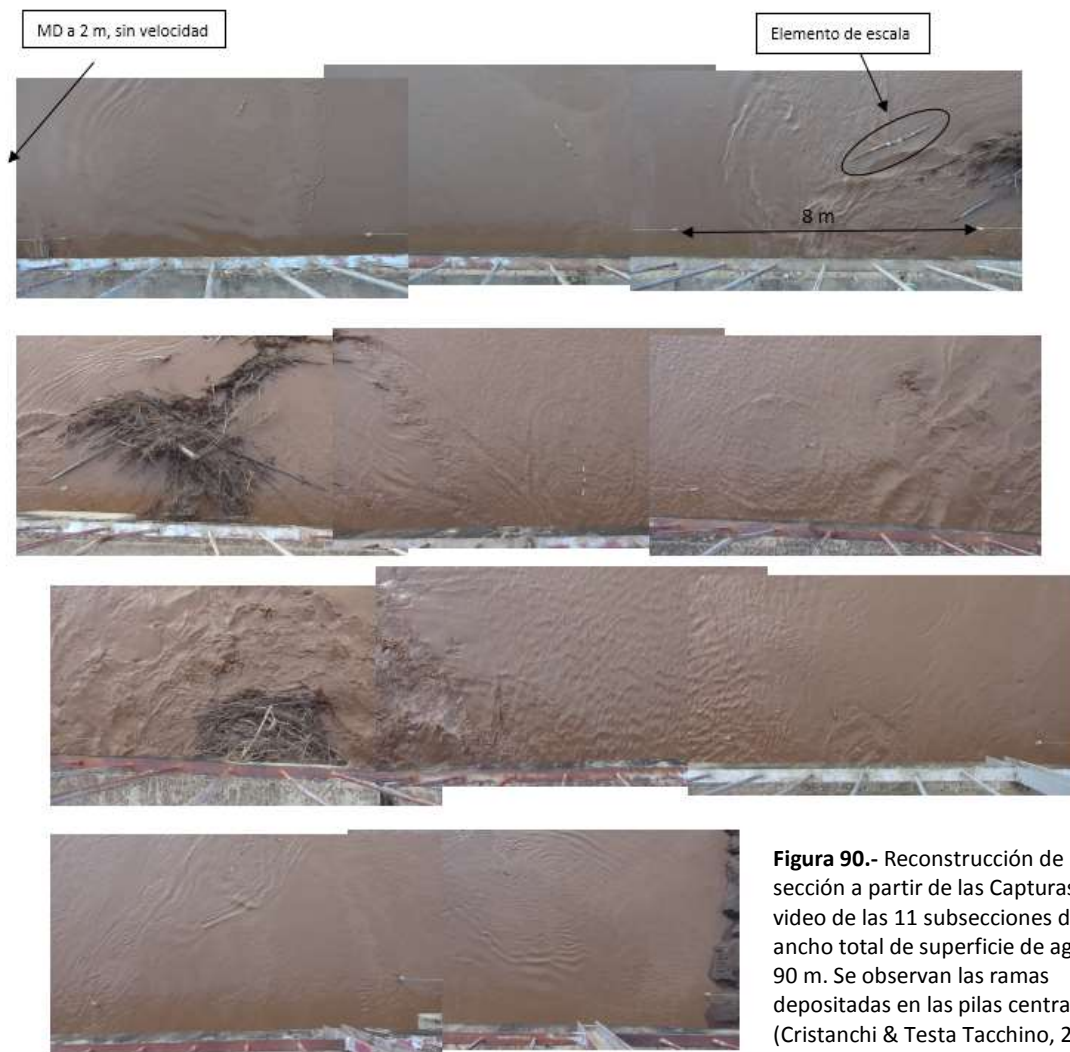


Figura 90.- Reconstrucción de la sección a partir de las Capturas de video de las 11 subsecciones del río, ancho total de superficie de agua 90 m. Se observan las ramas depositadas en las pilas centrales (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).

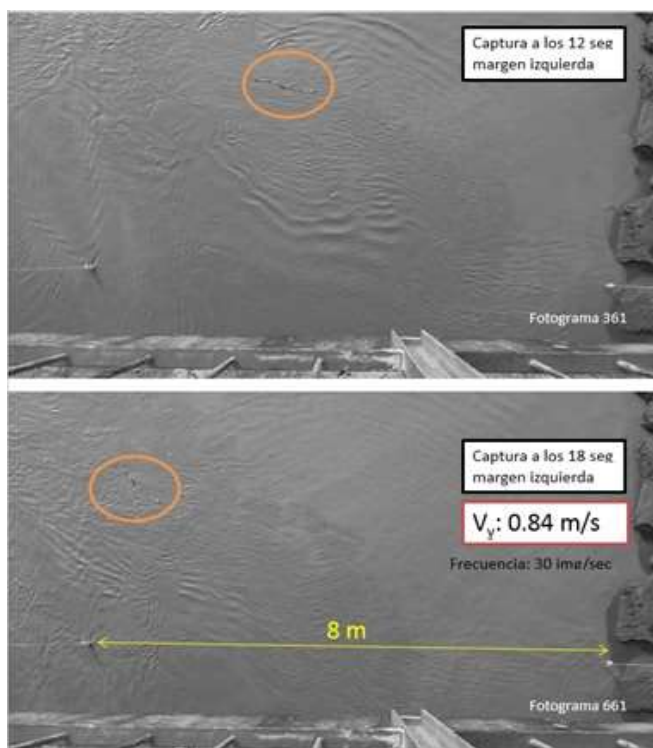


Figura 91.- Instantáneas para el cálculo de la Velocidad Superficial, Imágenes obtenidas por software PTVlab (CETA-UNC), (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).

Se obtuvo como resultado de los aforos coeficientes de Manning al medir la pendiente de superficie de agua a partir de dos escalas vinculadas: una aguas arriba y otra aguas abajo de Misión La Paz. Los resultados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18.- Cálculo del coeficiente de Manning (n) a partir de aforos con flotadores, lecturas de escala mayor a 5 m (Cristanchi & Testa Tacchino, 2014).

Fecha mm/dd/yy	Lectura de Escala (m)	Área (m ²)	Coeficiente "n" de Manning	Pendiente de la Superficie de Agua	Velocidad media aforada (m/s)	Velocidad calculada con "n"	V _{mediaaforada} / V _{calculada} "n" %	Caudal calculado con "n"	Q _{aforado} / Q _{calculado} "n" %
1/27/2014	5.07	372.55	0.0375	0.00186	1.979	1.98	100%	737.90	100%
1/30/2014	5.37	483.20	0.0400	0.00186	2.238	2.25	99%	1089.59	99%
2/5/2014	5.26	750.03	0.0570	0.00198	2.196	2.21	99%	1659.87	99%

En esta campaña también se visitó la zona de desborde Las Vertientes, aguas abajo de Misión La Paz.

5.3. Tercera Campaña

Los aforos se Realizaron en Villamontes, Bolivia. Participaron de esta campaña diferentes equipos profesionales: Por la DE-CTN participaron el Ing. Claudio Laboranti, el Ing. Diego Ortiz, la Inga. Alejandra Cristanchi y el señor Walter Mongelos; Por EVARSA el Ing. Diego Fontana, y los Técnicos Raúl Canchi y David Acosta; Por el INA el Ing. Horacio Hillton; Por la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de Universidad Nacional del Litoral el Dr. Ing. Ricardo Szupiany y el Ing. Lucas Domínguez Rubén (ADCP); Por Centro de Estudios y Tecnología del Agua y Laboratorio de Hidráulica Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba el Dr. Ing. Carlos M. García, el MSc. Ing. Antoine Patalano y el autor.

El Dr. Szupiany, el Dr. García, el Ing. Laboranti y el Ing. Dominguez Rubén fueron los responsables de las pruebas del instrumental ADCP y el Ing. Patalano de la técnica de Velocimetría por Imágenes.

La tecnología Doppler (que utiliza el principio físico del cambio de frecuencia ante el rebote acústico que produce una partícula transportada por el flujo) se ha tornado actualmente una práctica universal en hidráulica fluvial debido a su simplicidad y bajo costo relativo, a lo que se le adiciona el hecho de proveer una alta resolución temporal y espacial del campo de flujo adquiriendo información que no es posible obtener por medio de métodos convencionales. El instrumento acústico utilizado comúnmente en el caso de mediciones en campo, es el ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Aun cuando se ha comprobado que los ADCP son muy eficientes para cuantificar los caudales escurridos, caracterizar los campos de flujo y estimar las descargas sólidas de sedimentos en suspensión, algunas mediciones realizadas con esta tecnología en el Río Pilcomayo mostraron inconvenientes en su implementación debido a las altas tasas de transporte de sedimentos en suspensión presentes, las que atenúan significativamente las señales acústicas. Para las condiciones experimentales en los que los ADCP no puedan ser utilizados, existen antecedentes en la literatura donde se recomienda la implementación de una tecnología de medición óptima basada en una técnica de velocimetría por imágenes de partículas a gran escala (LSPIV) la cual no es intrusiva, y puede ser implementada con bajo costo relativo.

Se compararon técnicas convencionales utilizando molinete desde vagoneta con tecnología Acústica utilizando tres diferentes ADCP con diferentes frecuencias acústicas y velocimetría por imágenes de partículas a gran escala.

En la evaluación in situ se utilizaron tres Perfiladores de Corriente Acústico Doppler con diferentes frecuencias acústicas que definen las configuraciones de registro espacial y temporal. Así, se utilizó un ADCP “River Surveyour S5” para aguas poco profundas con una frecuencia acústica de 3MHz fabricado por la compañía YSI/Sontek y dos ADCP denominados “Workhorse Río Grande” fabricado por la compañía Teledyne RD Instruments, que presentan similares características físicas pero trabajan a diferentes frecuencias, (600 kHz y 1200 kHz), brindándoles diferentes capacidades y condiciones para aforar, caracterizar el flujo y el transporte de sedimentos. Todos los ADCP se instalaron en plataforma móviles para su utilización y se operaron desde la vagoneta. Para la implementación de LSPIV (medición del campo de velocidad superficial en la sección de interés) se ha utilizado una cámara digital WX300 de marca SONY. La cámara fue colocada sobre una grúa encima de un trípode lo que permitió tener suficiente altura para enfocar sobre la sección de interés y la cámara digital se controló de forma remota. Se asumió que los patrones visibles de la superficie del agua se desplazan a la misma o casi a la misma velocidad que ella. Esta hipótesis nos permite utilizar las imperfecciones visibles a la superficie del agua como trazador. Todo el sistema experimental descrito se ubicó sobre la margen izquierda del río.



Figura 92.- Configuración del sistema para la implementación de la técnica de PIV. La cámara digital se ha montado sobre una grúa desde la margen izquierda del río (Szupiany, y otros, 2014).

La Figura 93 muestra el campo de velocidades de flujo [m/s] registrado con el ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz de frecuencia. Por otra parte el ADCP “River Surveyour S5” para aguas poco profundas caracterizó el campo de velocidades de la región cercana a la superficie libre (2.5m) a lo largo de toda la sección transversal. Este perfilador no registró valores de velocidad a profundidades mayores debido a su elevada frecuencia acústica. A partir del perfil transversal de velocidades superficiales con LSPIV y la batimetría medida con ADCP se estimó el valor de caudal escurrido igual a 582 m³/s

(diferencia menor al 7 % con el valor aforado con ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz).

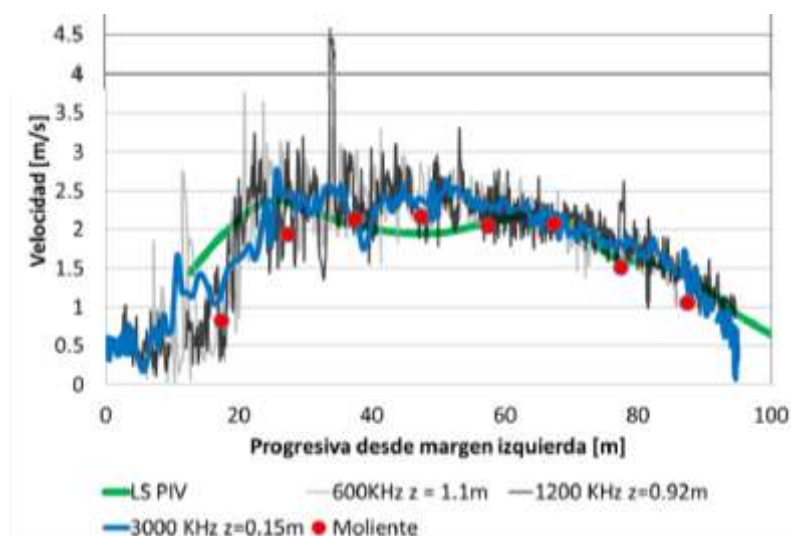


Figura 93.- Contraste entre perfiles transversales de velocidad medidos en la región cercana a la superficie libre con las diferentes técnicas (Szupiany, y otros, 2014).

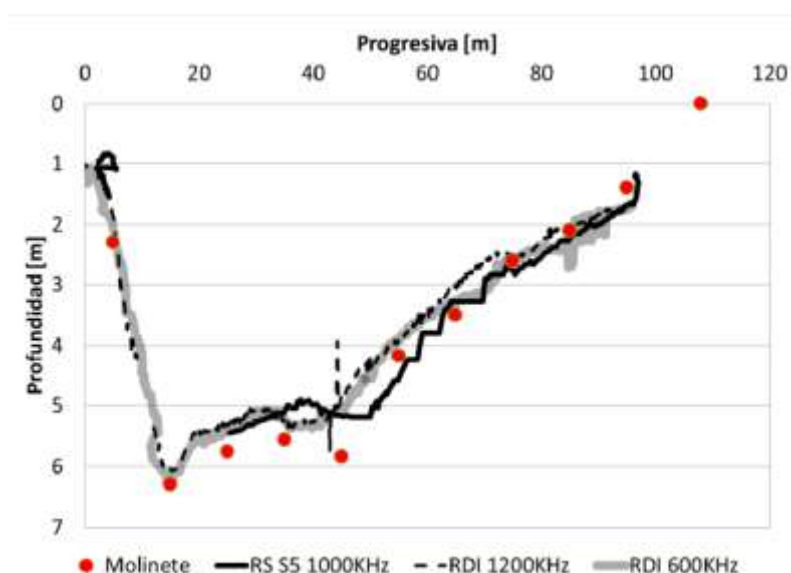


Figura 94.- Contraste entre la batimetría de la sección transversal relevada durante la medición de caudales con las diferentes técnicas en la sección de aforo de Villamontes (Szupiany, y otros, 2014).

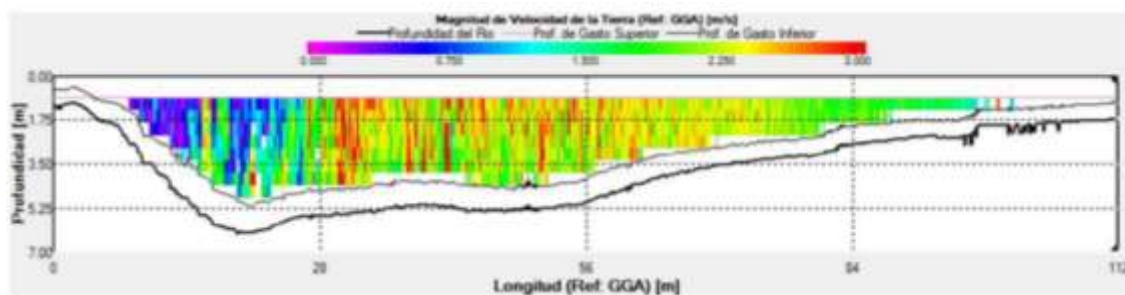


Figura 95.- Campo de Velocidades de flujo [m/s] registrado con ADCP “Workhorse Río Grande” de 600 kHz de frecuencia, utilizando una plataforma móvil. Las progresivas indican distancia desde margen izquierda (Szupiany, y otros, 2014).

Los instrumentos y las metodologías experimentales evaluadas presentaron aspectos positivos y negativos. Los Perfiladores RDI “Workhorse Río Grande” de ambas frecuencias (600 kHz y 1200 kHz) demostraron ser aptos para determinar el caudal, perfil de velocidades y morfología del fondo. Ajustes de parámetros del instrumento debieron realizarse para ampliar los rangos límites producto de las elevadas atenuaciones de la señal. El ADCP de 600 kHz presenta mayor robustez (sin pérdidas de datos de velocidad ni registro del fondo) aunque su resolución espacial es menor que perfiladores con mayor frecuencia acústica. El valor de caudal registrado con ambos ADCP RDI difiere en menos de un 5 % respecto al método tradicional. La técnica LSPIV reprodujo en forma satisfactoria el campo de velocidades superficiales de flujo al contrastar esta información con la registrada con el ADCP “River Surveyour S5”. Este último perfilador, si bien presenta la mayor resolución espacial (celdas de hasta 2cm) solo registra el campo de velocidades de la región cercana a la superficie libre (2.5m) a lo largo de toda la sección transversal. Este perfilador no registró valores de velocidad a profundidades mayores debido a su elevada frecuencia acústica.

6. Análisis de Desbordes en el tramo investigado

La zona de estudio se enmarca en la cuenca baja del río Pilcomayo, en el tramo que va desde Villamontes, Bolivia (21°15' S; 63°28' O) hasta Misión La Paz / Pozo Hondo, Argentina / Paraguay (22°35' S; 62°23' O), tramo donde se ubican la mayoría de los puntos críticos con riesgo de avulsión. En esta tesis se estudian cuatro desbordes (Figura 96) que se encuentran aguas arriba de Misión La Paz: en margen derecha La Gracia a 6,4 km y El Chañaral a 51,2 km, en margen izquierda Pozo Hondo a 10,6 km y La Puerta a 72,8 km.

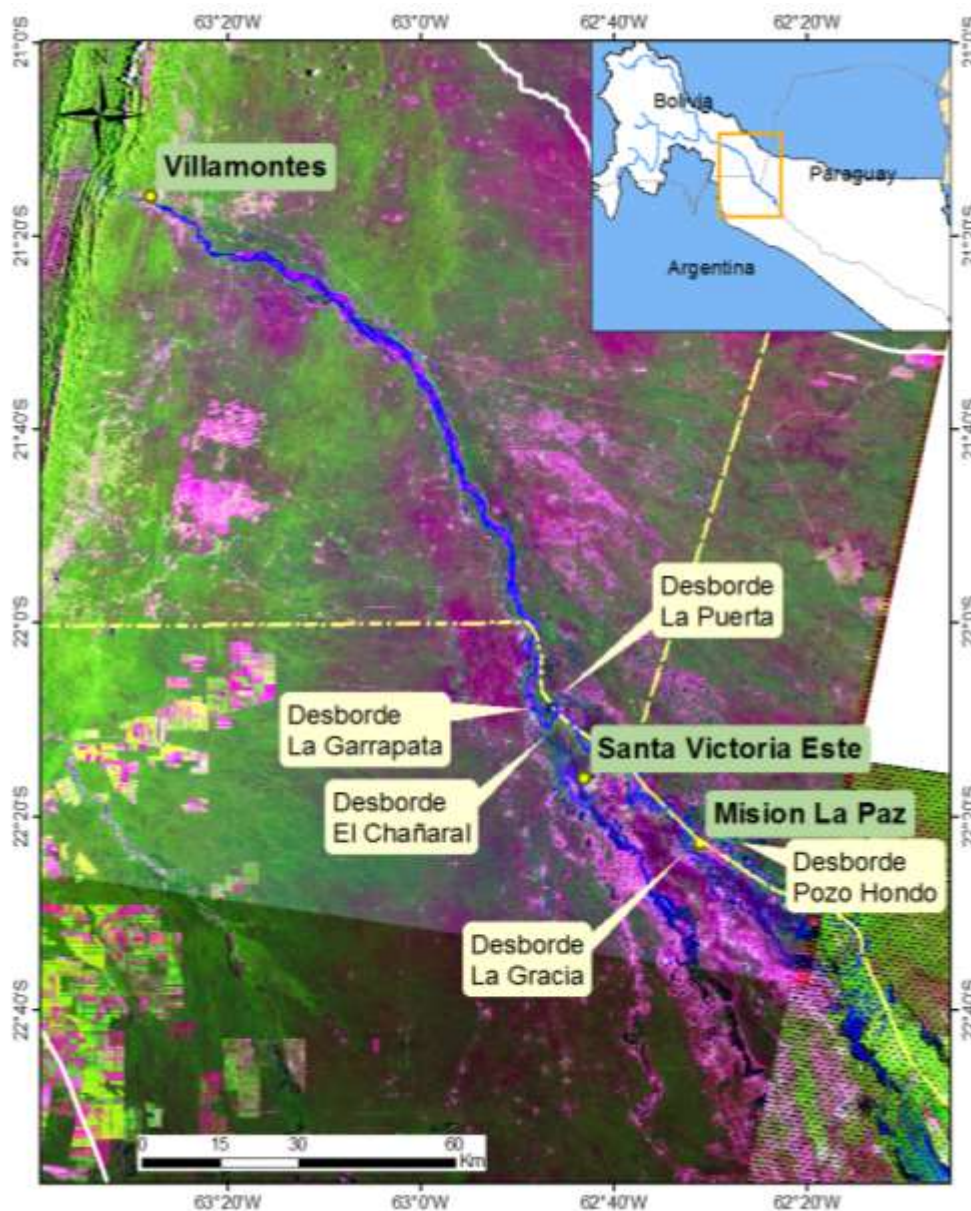


Figura 96.- Detalle de ubicación. (Elaboración Propia)

En el Río Pilcomayo los desbordes se dan en los bajos de las márgenes naturales, a los que se conocen como puntos críticos. Este río posee un cauce de tipo colgado, las llanuras de inundación tienen menor cota que sus márgenes. Los ríos colgados aparentemente serían la condición ideal para que ocurra una avulsión. Sin embargo, esto no es tan así, en el río Amarillo de 1600 roturas de albardones solo 7 resultaron en avulsión. Otra posible causa es la tasa de sedimentación en el lecho, en el río Amarillo el lecho aumenta 10 cm por año y su tasa de transporte es de 30 kg/m^3 (Slingerland & Smith, 2004).

Es necesario caracterizar estos eventos, es decir determinar el área de la mancha de inundación, su longitud y su tiempo de permanencia, como insumos necesarios para orientar los estudios a la estimación de volúmenes de agua distribuidos naturalmente a cada país de la cuenca.

6.1. Aplicación de productos de teledetección

6.1.1. Productos de Satélite

La técnica de análisis por sensores remotos permite una visión global del área de estudio, incorpora información en regiones no visibles del espectro, así como observación a distintas escalas y frecuencia con homogeneidad en la adquisición.

La energía reflejada por las cubiertas terrestres es captada por el sensor y difiere en función de la región espectral (banda) a la que éste sea sensible. Esto permite realizar composiciones en color, combinando tres bandas, a las cuales se les asigna los colores primarios azul, verde y rojo.

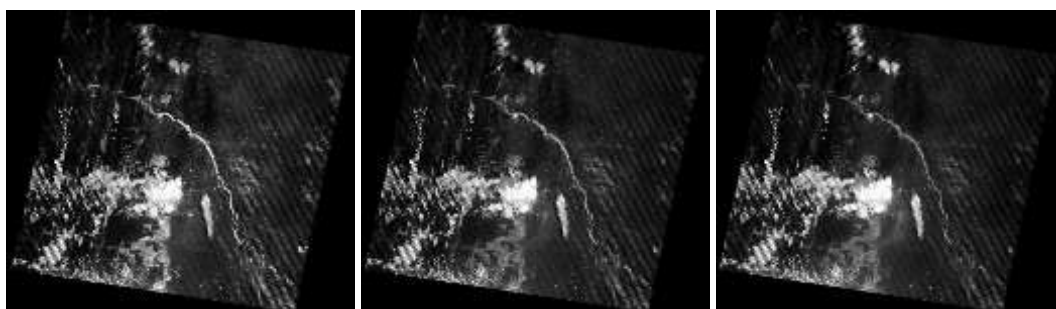


Figura 97.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Bandas: 3 (roja), 2 (verde) y 1 (azul) en escala de grises.

Las más frecuentes en fotografía aérea son las composiciones en color natural. Con imágenes espaciales no es tan frecuente porque pocos sensores incluyen un canal sensible al azul. Los sensores TM y ETM del programa Landsat sí permiten construir este tipo de combinaciones. En la Figura 97, a cada banda del espectro visible -azul (banda 1 del sensor ETM, en este caso), verde (banda 2) y rojo (banda 3)- se le asigna los colores primarios azul, verde y rojo, en el mismo orden. La Figura 98 presenta la combinación de estas bandas, que también se la conoce como composición ETM321 (RGB).



Figura 98.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición color natural, Bandas 321(RGB).

En el análisis con imágenes satelitales, tal vez la combinación más frecuente sea la conocida como falso color convencional. Una buena parte de los sensores de los satélites de observación de la Tierra relacionados con los recursos naturales disponen de canales sensibles a una parte del espectro visible y del infrarrojo próximo. En la Figura 99 , se eligen tres bandas, una del infrarrojo cercano (banda 4, en el caso del sensor ETM), a la

que se le asigna el color rojo, y otras dos del visible -rojo (banda 3) y verde (banda 2)- a las que se les asignan los colores primarios verde y azul, respectivamente (ETM432, RGB).

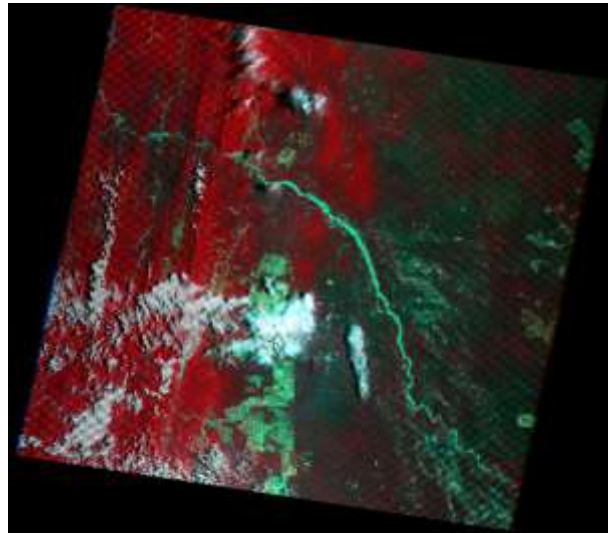


Figura 99.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Composición falso color convencional, Bandas 432.

Una variante de esta última composición coloreada es la denominada falso color mejorado. En este caso, se sustituye un canal del visible por el infrarrojo medio, que aporta información sobre las variaciones de humedad (Martínez Vega & Martín Isabel, 2010). En la Figura 100 (Izq.) se muestra un ejemplo, que combina las bandas 453 del sensor ETM de Landsat-7. Esta combinación presenta la vegetación en color rojo, muchas veces se utiliza la combinación 543 que representa a la vegetación de color verde y facilita la comprensión a personas que no están acostumbradas a trabajar con imágenes. Esta última combinación es la que se utiliza en esta tesis (Figura 100, Der.).

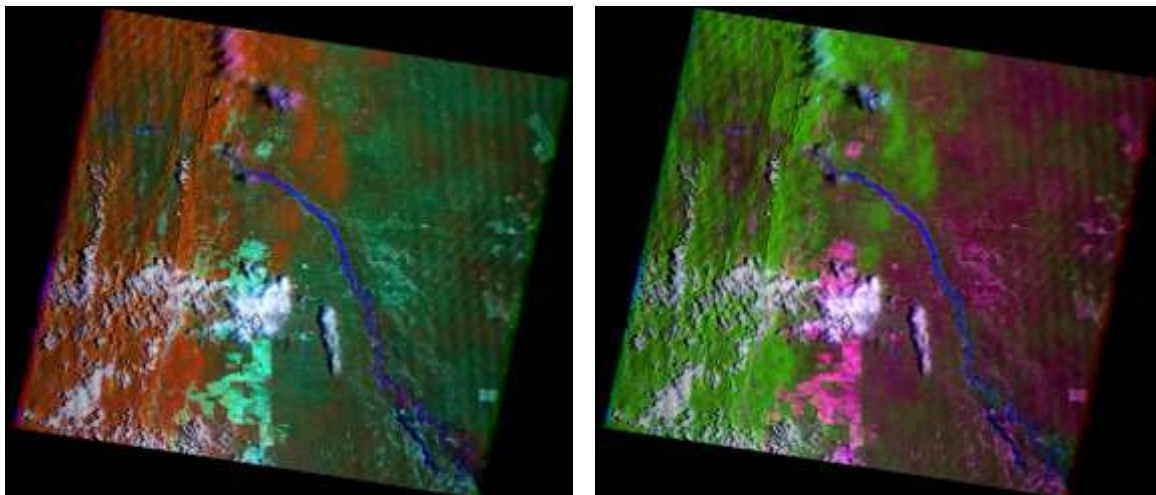


Figura 100.- Imagen Landsat 25/01/2013 – Comp. falso color mejorado, Izq. Bandas 453 y Der. Bandas 543

Si comparamos la imagen presentada en la Figura 100 (Der.) con la Figura 98 podemos notar que es mucho más sencillo identificar el curso de agua y el desborde en la primera, a su vez hay una diferencia de tonalidad entre río y desborde.

6.1.1.1. Imágenes Landsat

El programa Landsat es el registro global de la tierra desde el espacio más largo y continuo. Desde que se lanzó el primer satélite en 1972, los satélites Landsat observan la tierra

permitiendo a los científicos ver como la superficie de la tierra se transforma a lo largo del tiempo.

En la actualidad el programa se encuentra en su octava versión denominada: “Landsat Data Continuity Mission” (LDCM) es el octavo satélite de observación de la serie Landsat. La Figura 101 presenta la cobertura temporal histórica de cada misión.

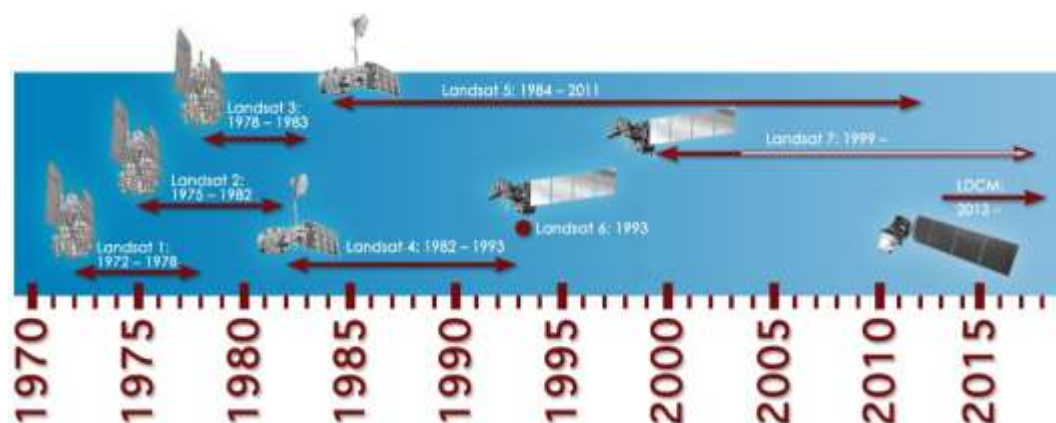


Figura 101.- Cobertura histórica de las imágenes Landsat

El satélite Landsat-7 fue diseñado para una vida útil de 5 años y tiene la capacidad de recolectar, así como transmitir hasta 532 imágenes por día. Se encuentra en una órbita Heliosíncrona, es decir, pasa siempre a la misma hora por un determinado lugar. Tiene visión de toda la superficie terrestre en un lapso de tiempo de 15 días, y realiza 232 órbitas. Cada imagen cubre aproximadamente un área de 180 km por 172 km. El instrumento esencial a bordo del satélite es el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). La Tabla 19 presenta las características del sensor del satélite Landsat 7 referidos a resolución espacial, temporal y espectral.

Tabla 19.- Resolución y características del Satélite Landsat 7.

Modo Espectral	Resolución Espacial	Espectro		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0,52 – 0,90 μm	8 bits	16 días
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - azul	0,45 – 0,52 μm		
		Banda 2 - verde	0,53 – 0,61 μm		
		Banda 3 - rojo	0,63 – 0,69 μm		
		Banda 4 - infrarrojo cercano 1	0,78 – 0,90 μm		
		Banda 5 - infrarrojo medio	1,55 – 1,75 μm		
		Banda 7 - infrarrojo medio	2,08 – 2,35 μm		
	60 metros	Banda 6 – infrarrojo térmico	10,4 – 12,5 μm		

El Landsat 8 también es Heliosíncrono con 705 km de altura orbital, cruza del Ecuador a las 10:00 am \pm 15' en nodo descendente (como en L4-7, no a las 9:45 como en L1-3). La superficie de cobertura es de 180 km por 180 km y la revisita máxima es de 16 días. La Tabla 20 presenta las características del sensor del satélite Landsat 8 referidos a resolución espacial, temporal y espectral.

Tabla 20.- Resolución y características del Satélite Landsat 8.

Modo Espectral	Resolución Espacial	Espectro		Resolución radiométrica	Resolución temporal
Pancromática	15 metros	Banda 8 - Pancromática	0,52 – 0,68 μm	12 bits	16 días
Multiespectral	30 metros	Banda 1 - litoral / aerosol	0,43 – 0,45 μm		
		Banda 2 - azul	0,45 – 0,52 μm		
		Banda 3 - verde	0,53 – 0,61 μm		
		Banda 4 - rojo	0,63 – 0,69 μm		
		Banda 5 - infrarrojo cercano 1	0,78 – 0,90 μm		
		Banda 6 - infrarrojo medio	1,55 – 1,75 μm		
		Banda 7 - infrarrojo termal	2,10 – 2,30 μm		
		Banda 9 - cirrus	1,36 – 1,39 μm		
	100 metros	Banda 10 – Infrarrojo térmico	10,30 – 11,30 μm		
	100 metros	Banda 11 – Infrarrojo térmico	11,50 – 12,50 μm		

La Figura 102 compara las frecuencias de onda que capta cada banda, en la fila superior están las características del Landsat 8 y en la inferior del Landsat 7. Se observa que el Landsat 8 tiene dos bandas termales, la banda 1 que cubre el área litoral o costero y aerosoles y la banda 9 o banda cirrus.

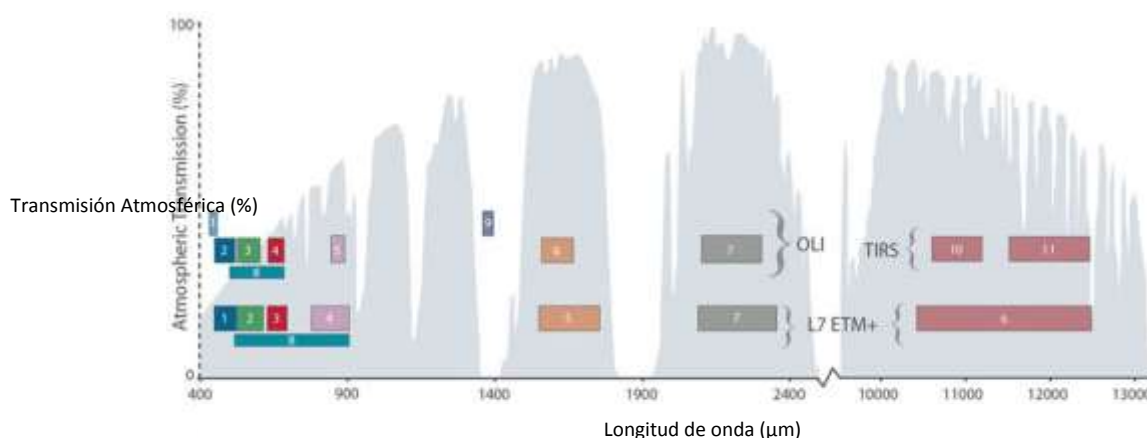


Figura 102.- Frecuencias de onda que capta cada Banda en Landsat 7 y Landsat 8

6.1.1.2. Modelo Digital del Terreno ASTER-GDEM

La NASA y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, conocido como METI, han diseñado un nuevo mapa topográfico digital: ASTER GDEM (ASTER Global Digital Elevation Model), creado a partir de casi 1,3 millones de imágenes estéreo recogidas por el radiómetro japonés llamado ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Este radiómetro es uno de los cinco instrumentos de observación de la Tierra que viajan a bordo del satélite americano Terra, lanzado en diciembre de 1999.

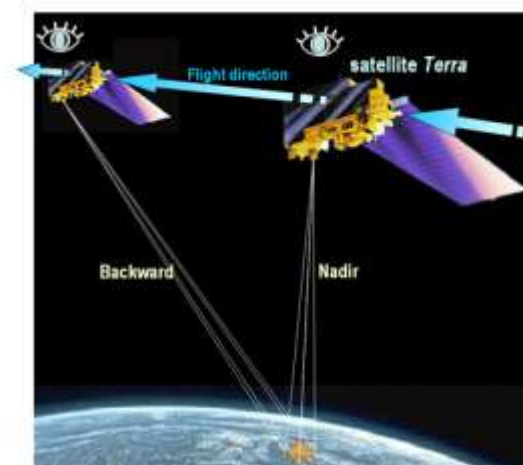


Figura 103.-Representación satélite Terra – ASTER-GDEM

ASTER recoge las imágenes del espectro visible y también las regiones de longitud de onda de las radiaciones térmicas infrarrojas, con resoluciones espaciales que van desde 15 a 90 metros. La Tabla 21 presenta las características principales de los productos ASTER-GDEM. Este nuevo mapa abarca 99% de la superficie del planeta y se encuentra disponible en internet sin costo alguno.

Tabla 21.- Características MDT de ASTER-GDEM (ERSDAC, 2003).

Parámetro	AGDEM
Sistema	VNIR/SWIR/TIR
Repetición	16 días
Rango espectral (bandas 3N y 3B)	0,78 - 0,86 μm
Ancho de barrido	60 Km
Producto	
Precisión vertical relativa	10 m
Precisión vertical absoluta	7 m
Precisión horizontal relativa	10 m
Precisión horizontal absoluta	7 m
Resolución espacial	1" (~30 m)
Datum	WGS84

6.1.2. Productos de radar

6.1.2.1. Modelo Digital del Terreno SRTM

La SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM) fue un proyecto conjunto entre la National Imagery and Mapping Agency (NIMA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y las Agencias Espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI). La misión se desarrolló durante 11 días del mes de Febrero del 2000, y el objetivo fue generar datos topográficos digitales para el 80% de la superficie de la tierra, entre las latitudes 60° Norte y 56° Sur, con puntos ubicados en una grilla de 1 arco-segundo en latitud y longitud, aproximadamente 30 m. La misión SRTM utilizó la técnica conocida como interferometría radar, en la que dos imágenes radar se toman de un mismo sitio desde dos posiciones diferentes. Se montaron dos antenas en el trasbordador, una, emisora y receptora sobre el trasbordador en sí, y otra receptora en un brazo extensible de 60 metros de longitud. El procesamiento de la información captada por ambas antenas generó un modelo digital de elevación de la superficie terrestre.

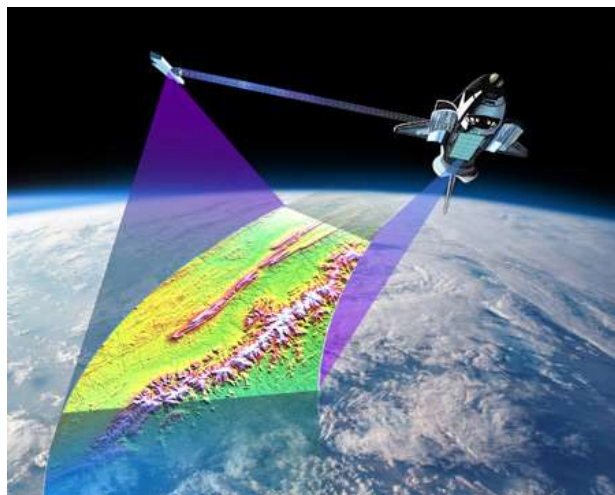


Figura 104.-Representación taxi espacial SRTM (CIAT, 2014)

El USGS (United States Geological Survey) es el responsable de publicar la información de esta misión. En Junio del 2003 se pusieron a disposición del público los datos para América del Sur, con una resolución espacial de 90 metros y resolución vertical entre 6 y 16 metros. La Tabla 22 presenta las características principales de los productos SRTM. Se espera que en este año, 2015, se publique la información con resolución de 30 m.

Tabla 22.- Características MDT de SRTM (USGS, 2014),

Parámetro	Banda C	Banda X
Sistema		
Longitud de onda	5,6 cm	3,1 cm
Frecuencia	5,3 GHz	9,6 GHz
Ancho de barrido	225 Km	50 Km
Producto		
Precisión vertical relativa	10 m	6 m
Precisión vertical absoluta	16 m	16 m
Precisión horizontal relativa	15 m	15 m
Precisión horizontal absoluta	20 m	20 m
Resolución espacial	1" (~30 m)	1" (~30 m)
Datum vertical	EGM96	WGS84
Datum horizontal	WGS84	WGS84

6.1.3. Modelo Digital del Terreno

El conocimiento del factor topográfico es un insumo básico para realizar la modelación matemática. Para modelar el tramo entre Villamontes y Misión la paz se han utilizado lo que se conocen como Modelo de Elevación Digital (DEM), obtenidos a partir de imágenes ASTER GDEM y SRTM. Se han comparado las dos para tener una idea más acabada de cuál representaría mejor el tramo en estudio.

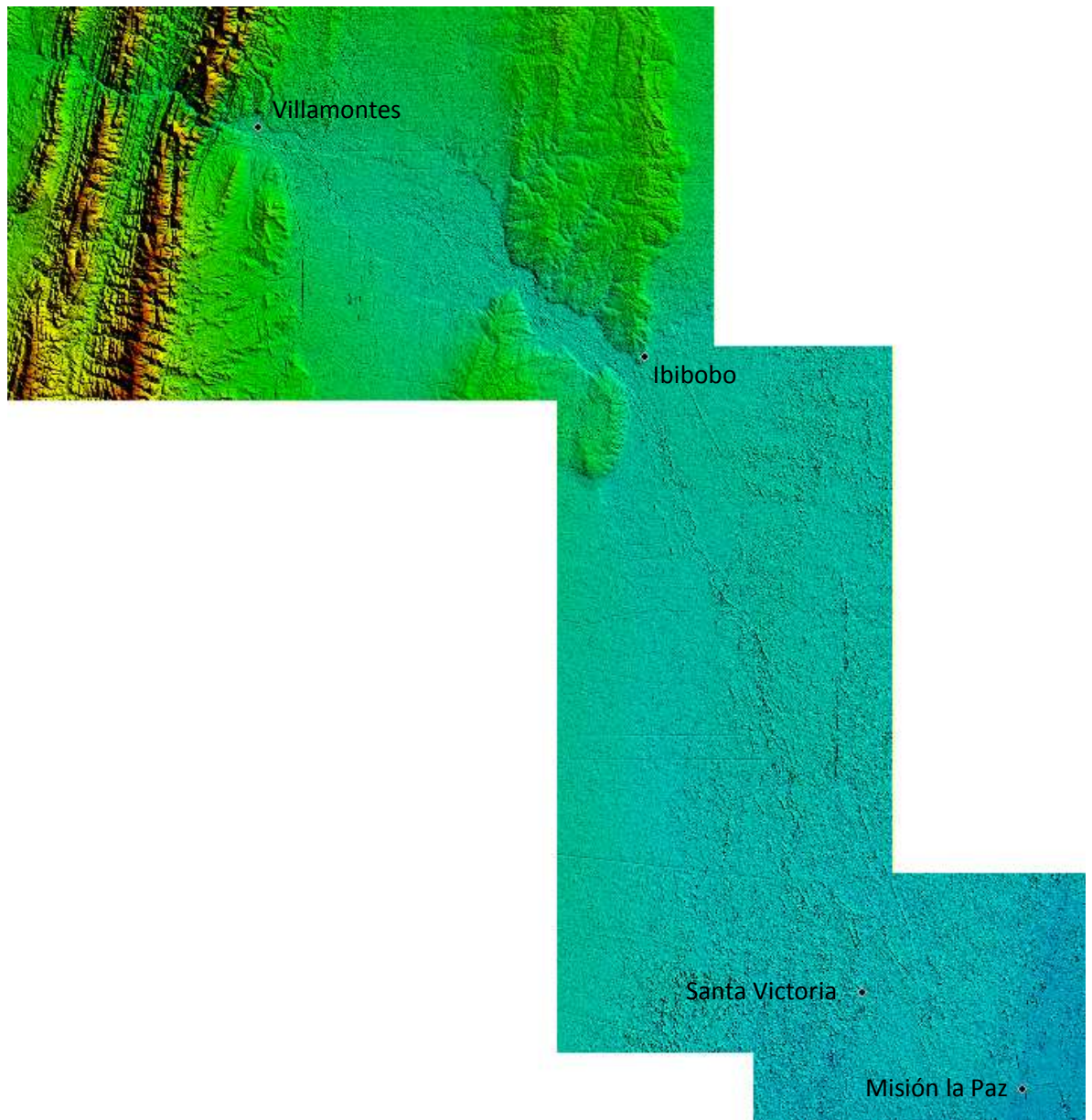


Figura 105.- Topografía ASTER, Río Pilcomayo y localidades de referencia.

Se han tomado 62 secciones transversales (Figura 106) para realizar la modelación numérica 1D cubriendo desde Villamontes a Misión La Paz, aproximadamente una longitud de 220 km y un área de 750 km².

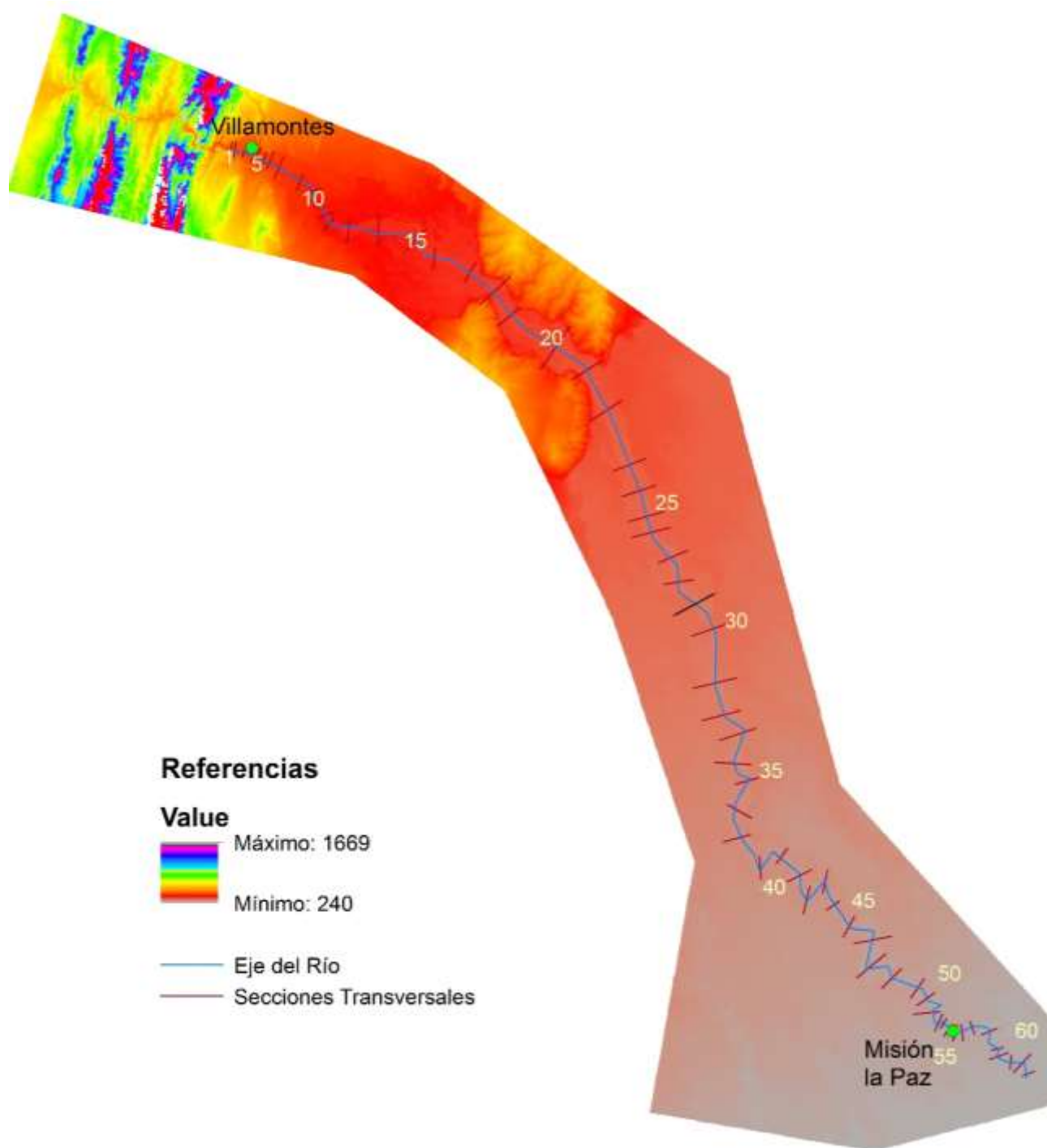


Figura 106.-Secciones en el tramo Villamontes a Misión La Paz por el Río Pilcomayo, fondo DEM de SRTM.

La Figura 107 presenta la topografía según SRTM, la Figura 108 según ASTER_GDEM y la Figura 109 presenta la diferencia entre ambas.



Figura 107.- Imagen SRTM



Figura 108.- Imagen ASTER



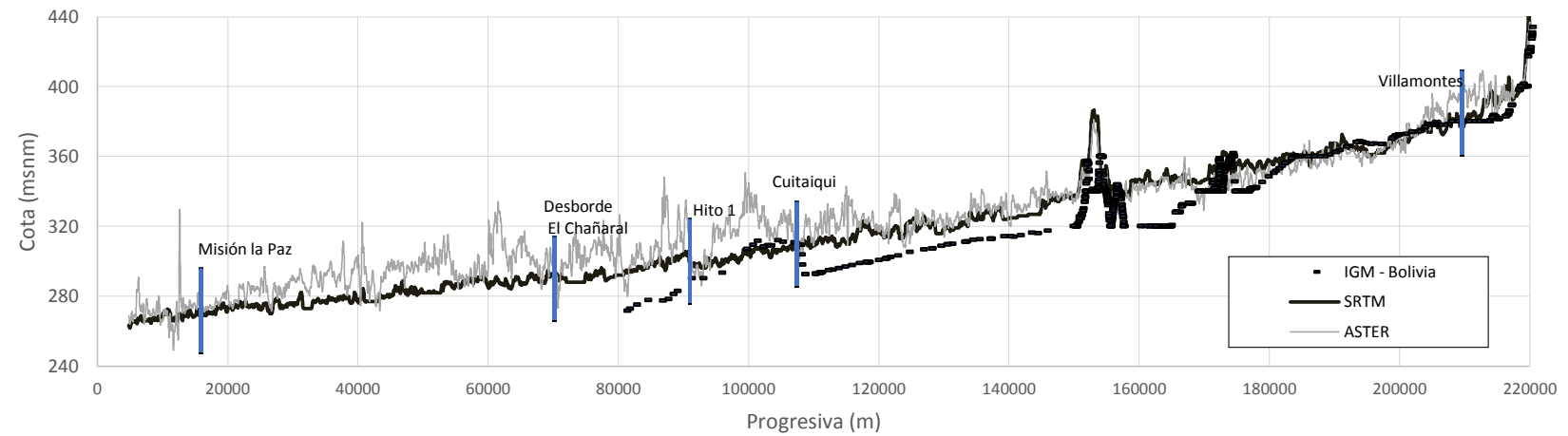
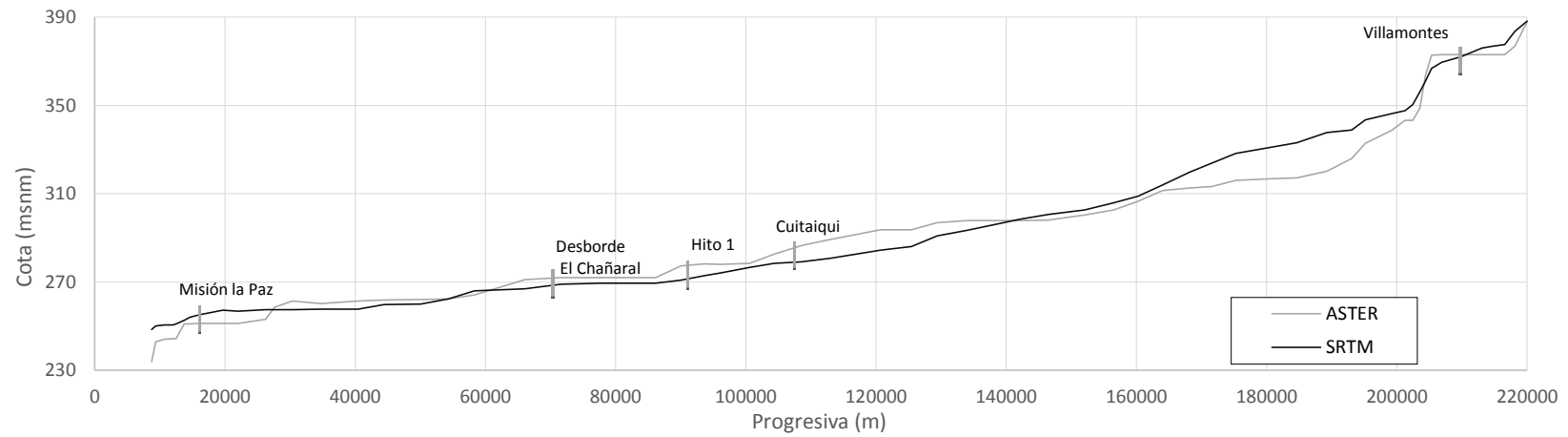
Figura 109.-Diferencia entre Imágenes ASTER y SRTM

EL SRTM consiste en un sistema de radar modificado que viajó a bordo de un taxi espacial en una misión de 11 días durante febrero de 2000. En este mes las aguas del Pilcomayo son altas, para esta fecha se registraron caudales de hasta $1713 \text{ m}^3/\text{s}$ en la estación de Misión La Paz.

No es posible saber en qué fecha fue obtenida la imagen ASTER GDEM debido a que es el resultado de la combinación de varias imágenes que cubren el área para lograr una conexión más suave con las áreas colindantes.

6.1.4. Comparación de Modelos Digitales del Terreno

Se compararon los perfiles longitudinales obtenidos mediante ASTER GDEM y SRTM, observándose que el SRTM da pendientes más suaves, mientras el ASTER presenta mayor variabilidad (Figura 110 y Figura 111).



En el tramo de estudio se compararon varias secciones encontrándose en algunas una mayor similitud y en otras una gran diferencia entre ambos DEM (Figura 112).



Figura 112.-Comparación de topografías extraídas de ASTER GDEM y SRTM en Diferentes secciones transversales a lo largo del Río Pilcomayo

También se compararon las secciones de los aforos con las proporcionadas por los modelos digitales de terreno SRTM y ASTER. Se desplazaron las secciones de SRTM y ASTER hasta hacer que coincida el ancho de la superficie de agua de los aforos con las márgenes de los DEM.

Se observó así, que el SRTM presenta, en el punto correspondiente al talweg, un nivel de superficie de agua de 1,30 m por encima del ASTER, y 4,30 m con el nivel de la superficie de agua del aforo del día 24 de febrero de 2013 ($Q= 584 \text{ m}^3/\text{s}$). Para una lectura de escala de 1,7 m, según la curva H-Q de Villamontes, corresponde un caudal de $230 \text{ m}^3/\text{s}$ en el caso del SRTM. Para el ASTER, tomando una lectura de escala de 0,80 m y 1,00 m el caudal correspondiente sería $33 \text{ m}^3/\text{s}$ y $48 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

A partir del ancho superficial medido sobre imágenes satelitales se desciende el fondo del cauce para que pueda transportar estos caudales sin consumir sección del MDT, con la ventaja, además, que ayuda a la estabilidad de la modelación.

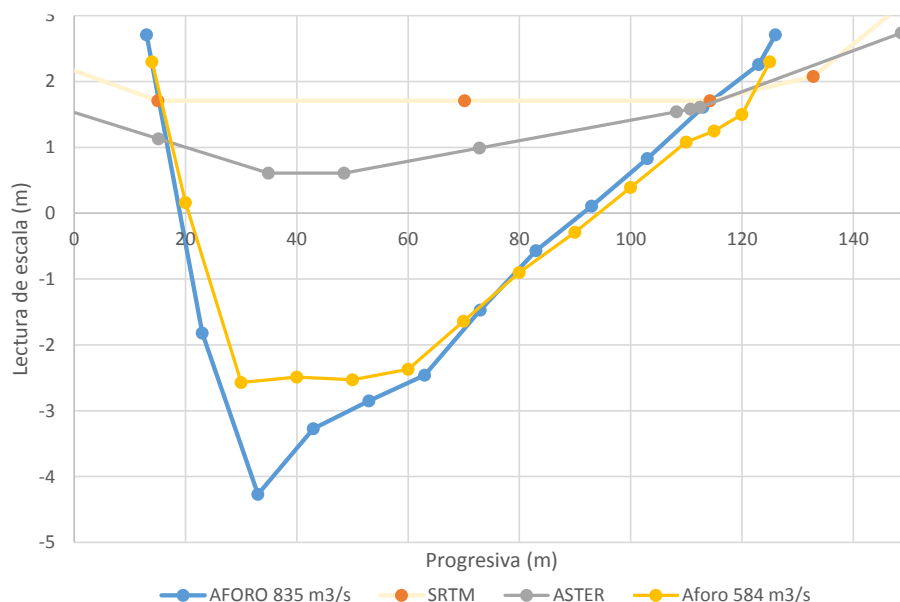


Figura 113.- Sección de VM según MDT ASTER, SRTM y dos aforos con $835 \text{ m}^3/\text{s}$ y $584 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal.

Para el caso de la sección de Misión La Paz se presenta mayor irregularidad entre las secciones. Se toma como valor de Caudal Inicial $200 \text{ m}^3/\text{s}$ tanto para ASTER como SRTM.

6.2. Análisis de crecidas (1999-2015)

6.2.1. Metodología

Se han recolectado imágenes Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 disponibles en fechas cercanas a crecidas importantes del Río Pilcomayo, de acuerdo a caudales obtenidos en las estaciones de las ciudades Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP). Las imágenes fueron obtenidas del USGS para el periodo comprendido entre los años 1982 y 2013. Se obtuvieron imágenes en falso color y se seleccionaron aquellas en las cuales se observaban manchas de agua en zonas que ya han sido determinadas como de posibles desbordes en trabajos previos realizados dentro del mismo equipo de investigación del LH-CETA, ver la cita bibliográfica: Baldissone, 2011.

Una vez seleccionadas las imágenes se procede a la interpretación, identificando así los contornos de los espejos de agua para posteriormente calcular sus áreas y longitud máxima. Se obtuvieron 11 imágenes en total para los años 1995, 2005, 2006, 2008 y 2013.

La combinación de bandas seleccionada para las imágenes Landsat 5 y 7 fue la 5-4-3, infrarrojo medio (Banda 5), infrarrojo cercano (Banda 4) y rojo (Banda 3), que nos brinda información para delimitar agua continental y resalta ciertos detalles que no se observan en las bandas de espectros visibles. Mientras más bandas infrarrojas utilicemos, con mayor precisión podremos ubicar lagos y ríos y en este caso particular las manchas de inundación. En esta combinación la vegetación se observa verde, permite ver diferencias de humedad y en general mientras más húmedo el suelo más oscuro aparece como consecuencia de la absorción infrarroja. Para las imágenes Landsat 8 se utilizó la combinación de bandas 6-5-4, que es la equivalente a la combinación 5-4-3 de las Landsat anteriores.

Se poseen datos hidrométricos históricos, serie de caudales medios diarios en dos estaciones: Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP) para los periodo en estudio. De acuerdo a la fecha de la imagen se obtiene el caudal medio del día de la imagen y el del día del pico de la crecida; los datos son proporcionados por la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo y por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación.

El satélite Landsat, como consecuencia de las características de los sensores pasivos que posee, no permite obtener imágenes los días nublados, debido a que no las puede atravesar, situación que limita el número de imágenes de calidad, ya que, obviamente, en general cuando hay crecida está lloviendo y hay nubes.

En los casos en que se dispone de más de una imagen satelital para una misma crecida o mancha de inundación por desborde, se realiza un estudio considerando la evolución en el tiempo de las superficies inundadas con el objeto de estimar tiempos de permanencia y evacuación de agua.

6.2.2. Análisis por eventos

A continuación se presentan diferentes apartados de acuerdo a los años de los desbordes registrados con las imágenes satelitales. Se presentan los hidrogramas así como también las imágenes satelitales ya procesadas en las que se han delimitado las áreas inundadas

por los desbordes. Estos se identifican con diferentes colores los diferentes desbordes: Con Rojo "El Chañaral", con Cian "La Gracia", con Verde "La Puerta" y con marrón "Pozo Hondo".

Antes se presenta la Tabla 1 que resume la información que será de utilidad para continuar el análisis. En la primera parte de la tabla se detallan las fechas en que fueron obtenidas las imágenes satelitales, los caudales para estas fechas y los caudales pico así como su fecha de ocurrencia. También se ha calculado el tiempo entre los picos de crecida en Villamontes y Misión La Paz. A continuación en la misma tabla se ha realizado un resumen de las características de los desbordes, su longitud y área en el momento de la imagen satelital.

Tabla 23.- Caudales pico del hidrograma de crecida y caudales en la fecha de la imagen; longitud y áreas de las zonas inundadas por desbordes calculados a partir de las imágenes. Q_p es el caudal pico de la crecida, Q el caudal medio diario en la fecha de la imagen y ΔT_{pico} es el tiempo que demora en arribar el pico entre VM y MLP.

Imagen aaaadd	Fecha dd/mm/yy	Fecha del Pico VM	Q_p VM m^3/s	Fecha del Pico MLP	Q_p MLP m^3/s	Q VM m^3/s	Q MLP m^3/s	ΔT_{pico} dias	Desbordes hacia Argentina		Desb. hacia Bolivia/Paraguay			
									El Chañaral	La Gracia	Pozo Hondo		La Puerta	
									Long. km	Área km^2	Long. km	Área km^2	Long. km	Área km^2
1999107	4/17/1999	22/03/99	9522.4	24/03/99	2079.0	532.3	337.1	2	61.4	178.7				
2005051	2/20/2005	15/02/05	5334.7	16/02/05	2972.5	538.6	743.4	1	19.6	32.1	12.0	61.0	14.0	35.4
2006030	1/30/2006	23/01/06	5321.1	24/01/06	2538.8	849.7	955.4	1	21.5	36.5	36.0	108.4	6.2	14.9
2006038	2/7/2006					559.4	526.5							
2006046	2/15/2006	13/02/06	2742.7	15/02/06	2445.5	1161.4	2445.5	2	20.9	59.7	7.6	5.4		
2006054	2/23/2006	13/02/06	2742.7	15/02/06	2445.5	348.1	474.3	2	28.1	46.9				
2007081	3/22/2007	18/03/07	2969.1	20/03/07	2486.4	450.9	480.2		22.2	25.1	10.4	14.7		
2008036	2/5/2008	26/01/08	4401.9	28/01/08	2867.0	771.3	929.3	2	61.0	158.7	37.6	136.2	8.9	10.6
2008044	2/13/2008		4401.9		2867.0	392.9	471.6		52.4	122.6	21.3	62.0		
2008060	2/29/2008	28/02/08	2036.6	29/02/08	2299.2	1075.7	2299.2		52.1	107.4	29.8	96.2		7.5
2008068	3/8/2008		2036.6		2299.2	906.9	1228.1		50.8	88.8	28.8	18.6		
2008076	3/16/2008	11/03/08	2297.4	13/03/08	2421.8	904.1	1298.0	2	76.0	272.6	29.2	103.7	5.7	12.8
2009062	3/3/2009	05/03/09	2678.0	07/03/09	2264.0	1229.0	1310.0							
2013025	1/25/2013	18/01/13	3860.1	23/01/13	2445.7	963.9	573.2	5.0	42.4	135.0	28.3	111.7	14.2	20.1
2014036	2/5/2014	01/02/14	3071.0	03/02/14	2136.9	1034.5	1335.6	2	47.7	115.8	0.0	0.0	5.4	7.0
2014037	2/6/2014					867.3	797.2	0	49.8	122.2	43.2	127.9	2.3	1.0
2015048	2/17/2015	15/02/15	2823.7	16/02/15	2471.4	1913.5	2384.7	1			31.2	112.3		

De la observación de las series de caudales (1961-2013), el caudal pico en Misión La Paz no supera los $4600 m^3/s$, y para el periodo de las imágenes no supera los $3000 m^3/s$ independientemente del caudal pico aguas arriba en Villamontes, probablemente porque se encuentre regulada por los desbordes que ocurren unos kilómetros aguas arriba. Misión La Paz es una sección muy inestable con un cambio continuo en su geometría y cota de fondo, lo que obliga a calibrar la curva h-q con aforos después de cada crecida. Actualmente se afora tres veces a la semana.

A continuación se muestran los resultados del análisis de las imágenes

6.2.2.1. Año 1999

La crecida del año 1999 llegó a un caudal en VM de 5610 m³/s. Se puede ver en la Figura 115 que a 26 días aún persiste una gran mancha de inundación de 178,7 Km² en El Chañaral, que desborda hacia Argentina y no se observa agua en las otras áreas de desborde. A partir de los hidrogramas de la Figura 114 se ha computado una diferencia de volúmenes entre ambas estaciones de 720 hm³. Llama la atención un caudal tan bajo en la estación MLP, quizás se pueda deber a problemas con la curva H-Q de esta estación.

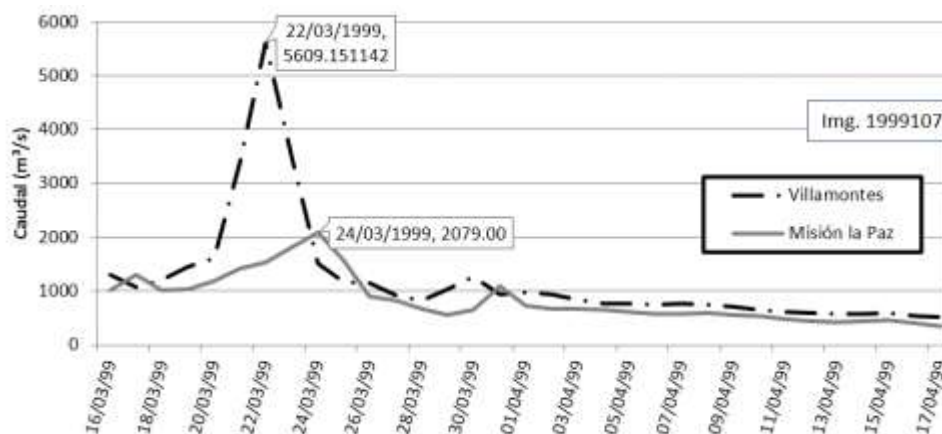


Figura 114.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 1999.

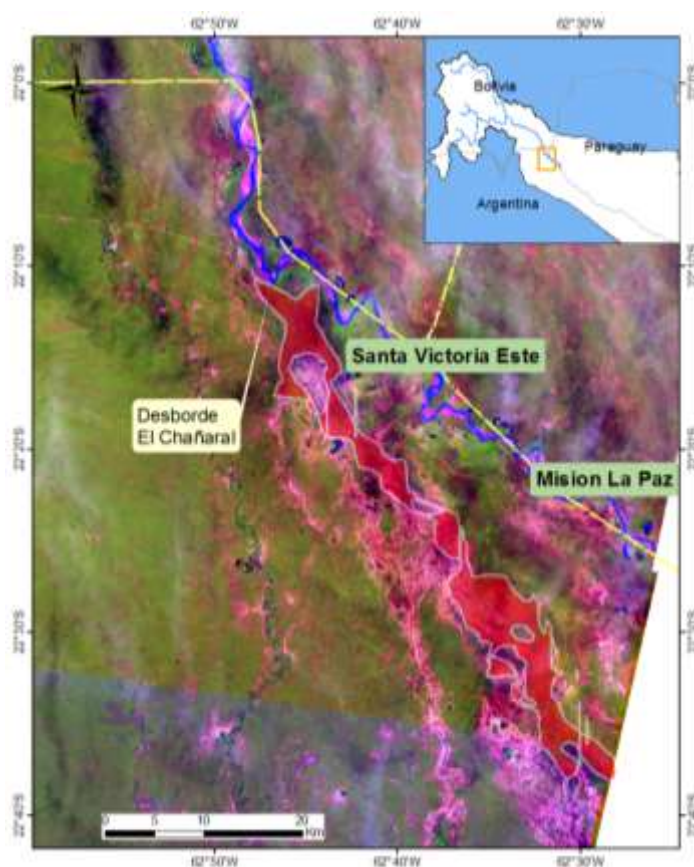


Figura 115.- Imagen Landsat 1999107 (17/04/1999)

6.2.2.2. Año 2005

Para este año la diferencia de volúmenes entre ambas estaciones es de 241 hm³, y se observa agua en tres desbordes: El Chañaral, La Gracia y en Pozo Hondo. En este caso hay mayor superficie cubierta de agua en La Gracia, y el área registrada en Pozo Hondo es la mayor de toda la serie de imágenes junto con la del año 2013. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 7 años.

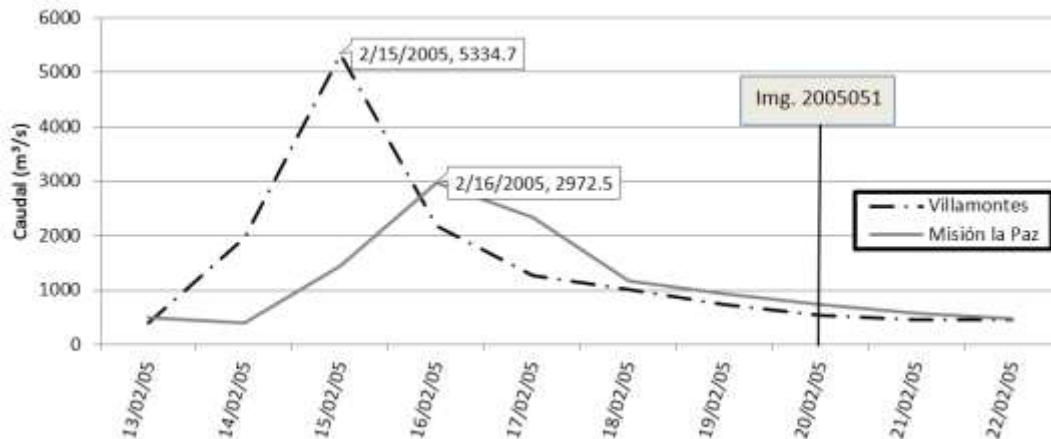


Figura 116.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2005.

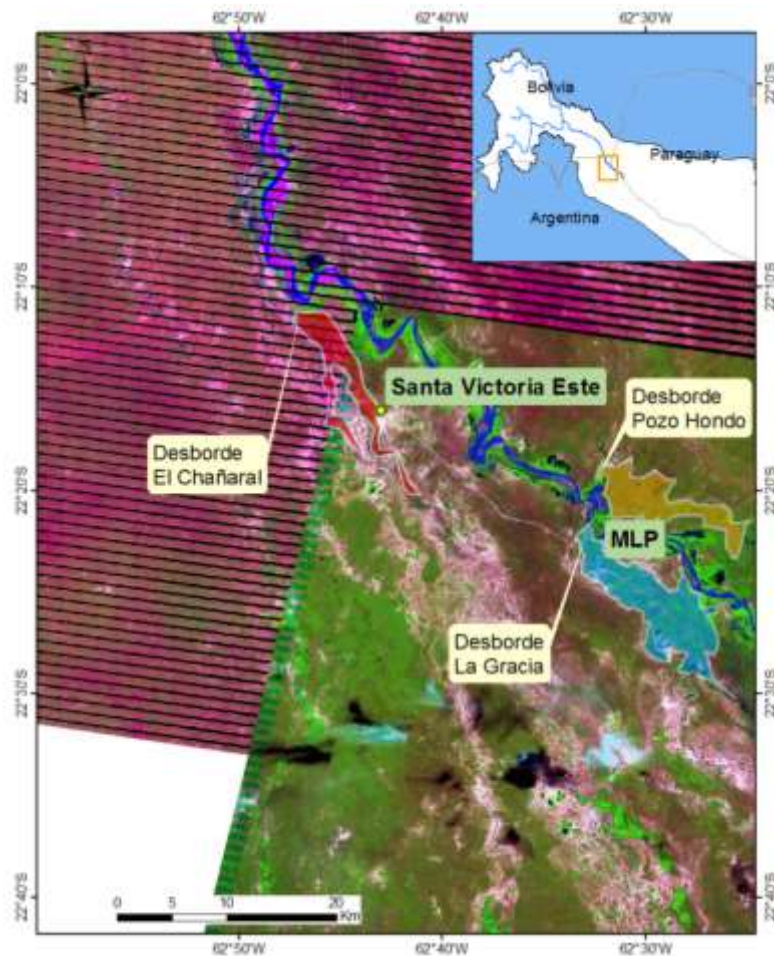


Figura 117.- Imagen 2005051 (20/02/2005).

6.2.2.3. Año 2006

Para este año se disponen de cuatro imágenes para el periodo comprendido entre el 12 de enero y el 25 de febrero. La diferencia de volúmenes de todo el periodo es 390 hm^3 , siendo hasta el 2 de febrero de 495 hm^3 y desde esa fecha hasta el fin del periodo, resulta un balance negativo en 105 hm^3 , que indicaría un error en los hidrogramas. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 3 años y si consideramos que hay dos picos cercanos, el periodo de retorno aumenta a 8 años con un caudal medio de $1897 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 10 días.

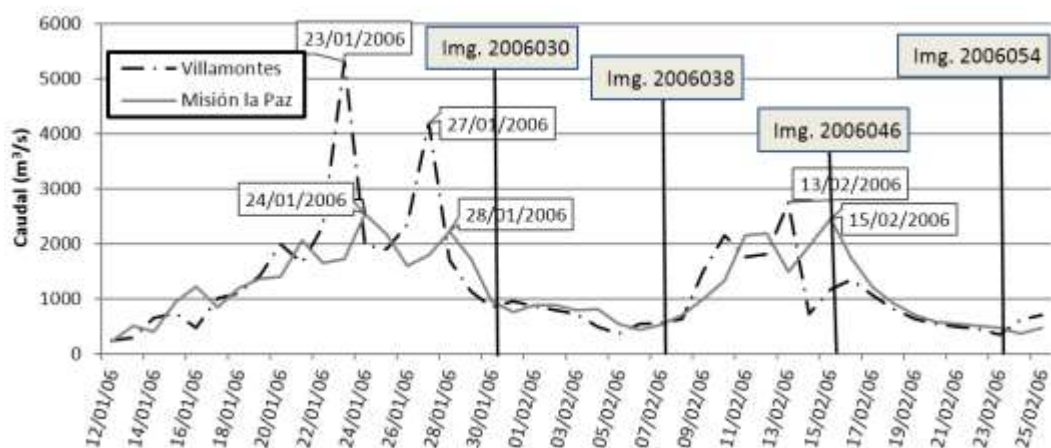


Figura 118.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2006.

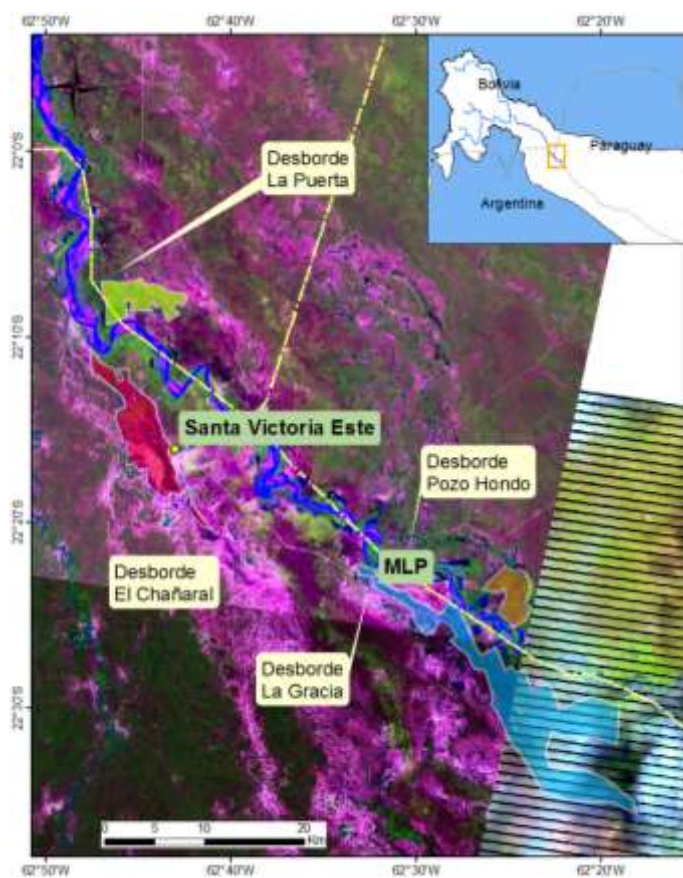


Figura 119.- Imagen 2006030 (30/01/2006)

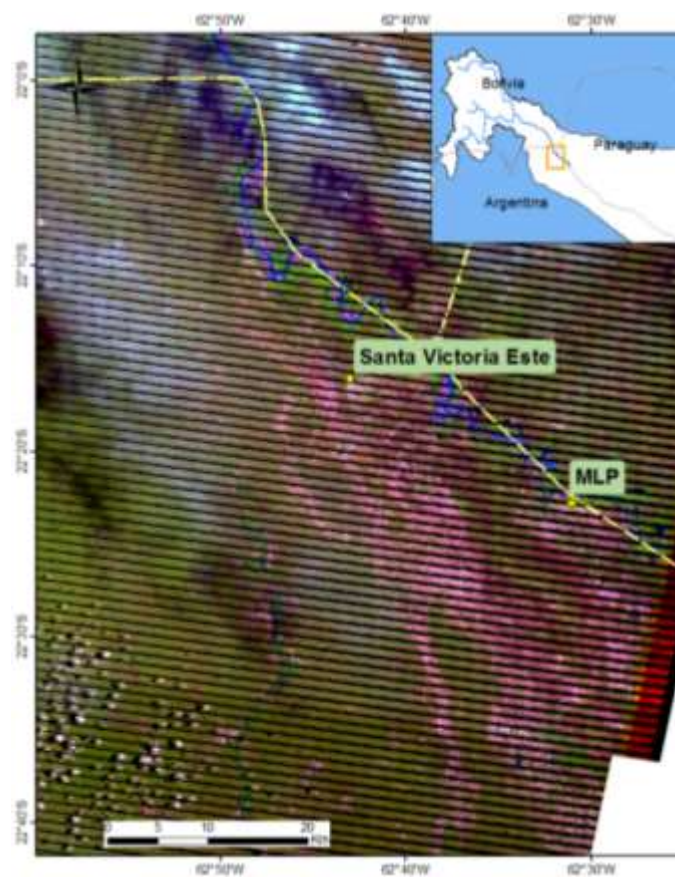


Figura 120.- Imagen 2006038 (07/02/2006).

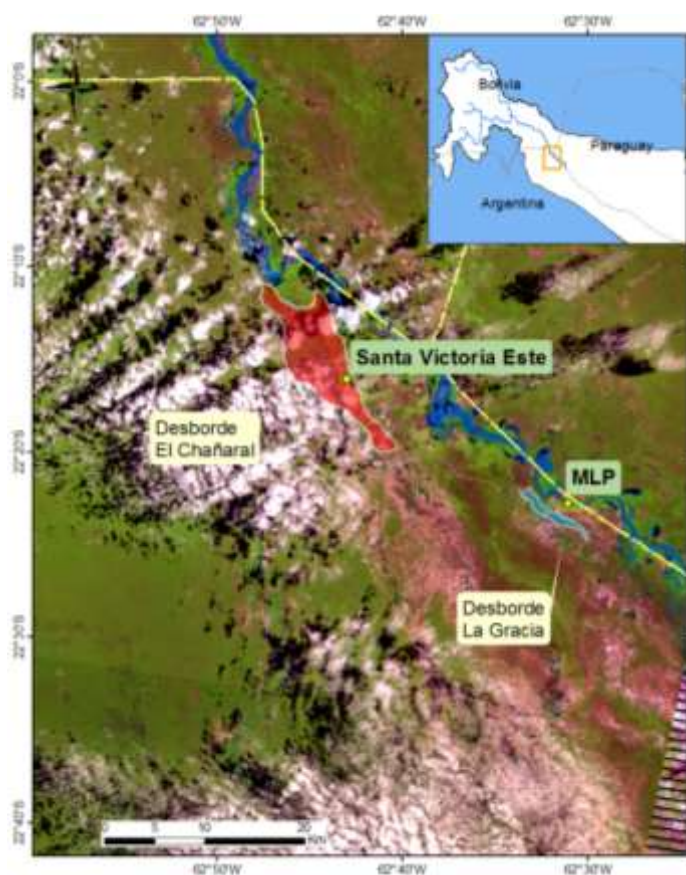


Figura 121.- Imagen 2006046 (15/02/2014).

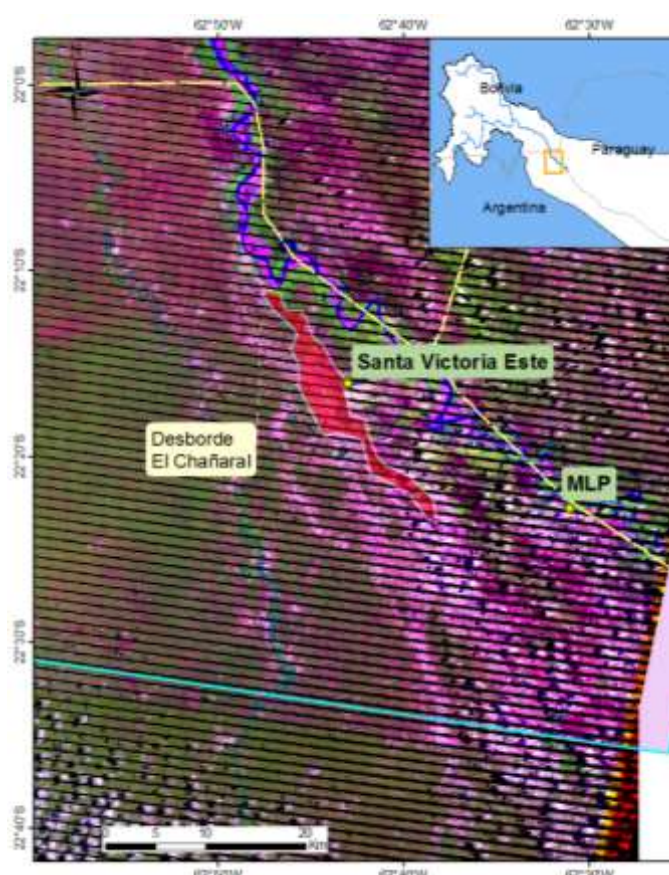


Figura 122.- Imagen 2006054 (23/02/2014).

A partir de las imágenes de 2006, se observa que para el 7 de febrero ya no había agua en ninguna de las cuatro zonas inundables por desbordes, por lo que se puede estimar que el agua pudo ser evacuada en 10 días desde el paso del último pico por MLP.

Para la próxima imagen de fecha 15 de febrero (Figura 121) hay zonas inundadas nuevamente, el caudal pico correspondiente a esta última fecha en VM ha sido de $2742,7 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que hace pensar que El Chañaral desborda para un caudal en VM inferior a los $2700 \text{ m}^3/\text{s}$. Además también ha desbordado La Gracia, por lo que se puede afirmar que para desbordar necesita un caudal también cercano a los $2700 \text{ m}^3/\text{s}$, aunque superior al de "El Chañaral", al ser menor el área desbordada y su persistencia. La importancia de esta información reside en su posterior utilización para calibrar y verificar los modelos hidrodinámico unidimensionales y bidimensionales.

Además, se puede ver que el pico pasa por MLP justo el día de la imagen ocupando un área de desborde de $59,7 \text{ km}^2$ y 8 días después, ya en la rama descendente del hidrograma, la superficie de agua en El Chañaral ha disminuido a $46,9 \text{ km}^2$, es decir se ha reducido en $12,8 \text{ km}^2$, un 21 %, aunque ahora con mayor longitud. Se podría estimar que el agua es evacuada a $1,6 \text{ km}^2/\text{día}$, ya sea por infiltración, evaporación o escurrimiento. El frente avanzó 7,2 km en 8 días o se puede estimar una velocidad de avance de 900 m/día .

A partir de los datos anteriores también se concluye que los desbordes La Gracia, Pozo Hondo y La Puerta son capaces de eliminar el agua en un periodo inferior a los 12 días contando desde el último valor de caudal superior a los $2700 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.2.2.4. Año 2007

Para el año 2007 se disponen de dos imágenes consecutivas del 22 y 23 de marzo. La diferencia de volúmenes entre el 16 y 24 de marzo, pico del hidrograma, ha sido de $11,2 \text{ hm}^3$. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 2,3 años.

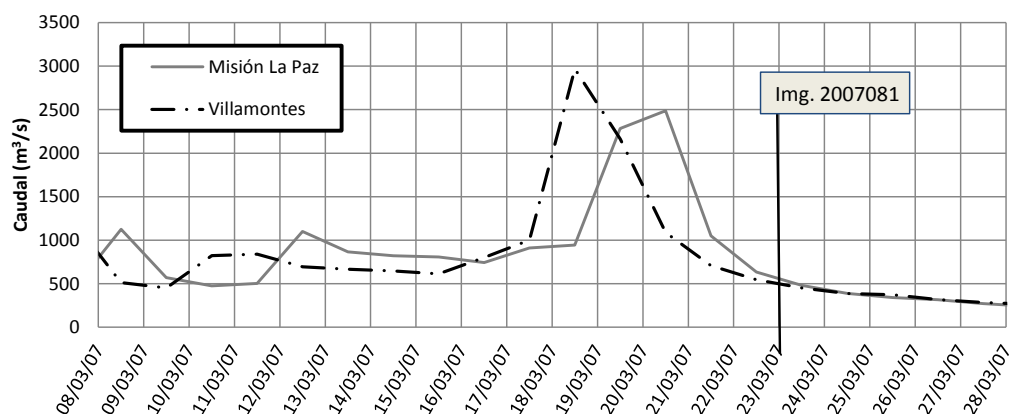


Figura 123.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2007.

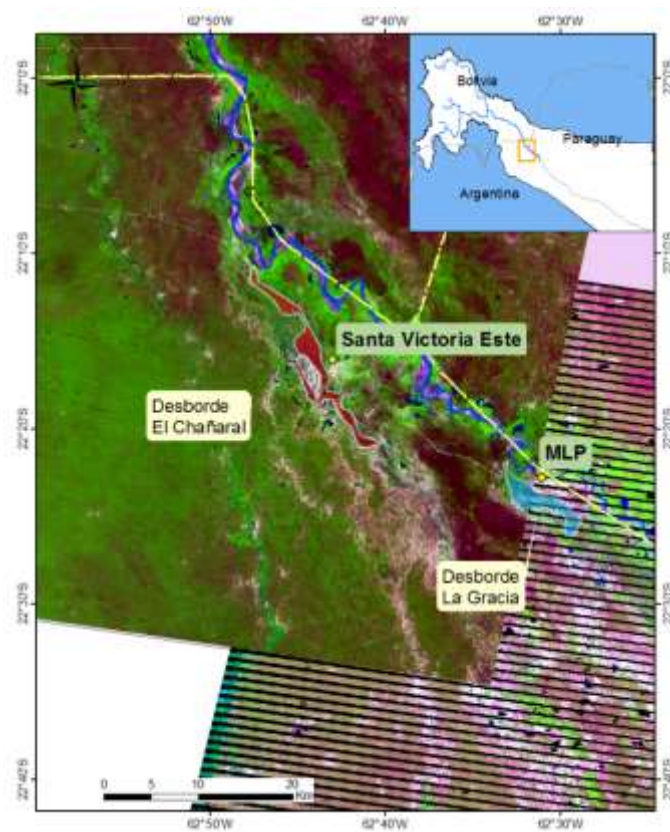


Figura 124.- Imagen Landsat 2007081 (22/03/2007)

6.2.2.5. Año 2008

Para este año se disponen de cinco imágenes para el periodo comprendido entre el 19 de enero y el 19 de marzo. La diferencia de volúmenes de todo el periodo es negativa en 340 hm^3 , lo que hace suponer que haya un error en la base de datos hidrológica, en especial para los eventos entre el 22 de febrero y el 19 de marzo. El volumen acumulado hasta el 13 de febrero es de 90 hm^3 . El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 9 años, no obstante, debido a que se sucedieron dos picos en poco tiempo el periodo de retorno es de 17 años, con un caudal promedio de $2130 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 10 días.

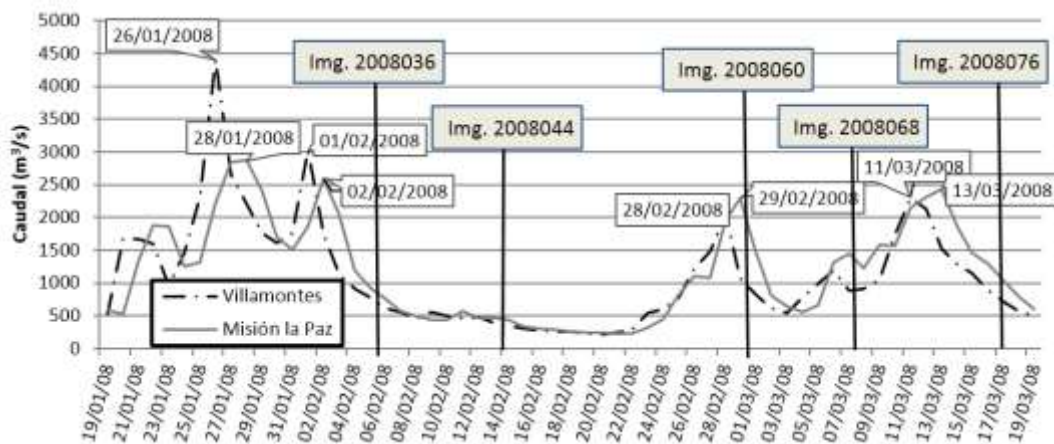


Figura 125.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2008.

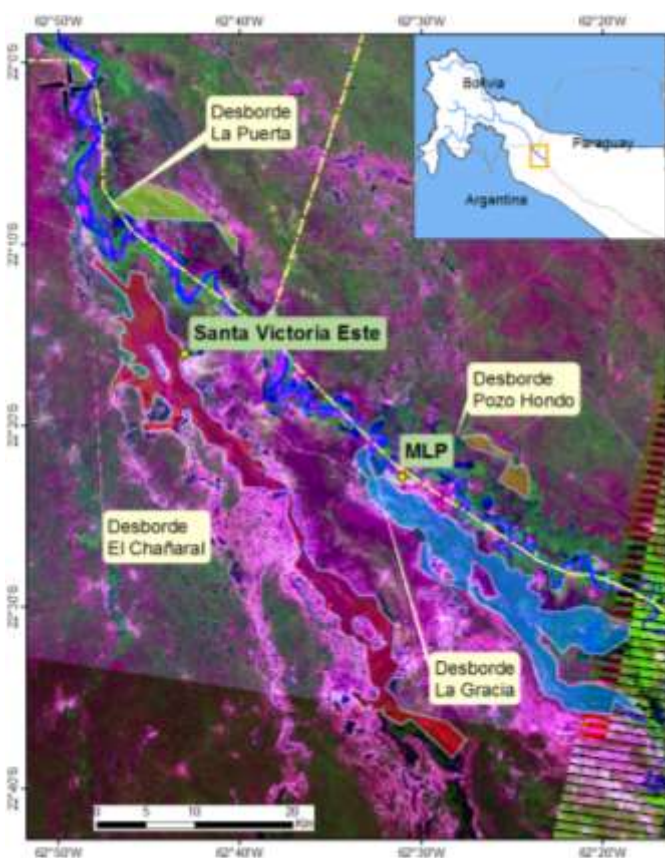


Figura 126.- Imagen 2008036 (05/02/2008).

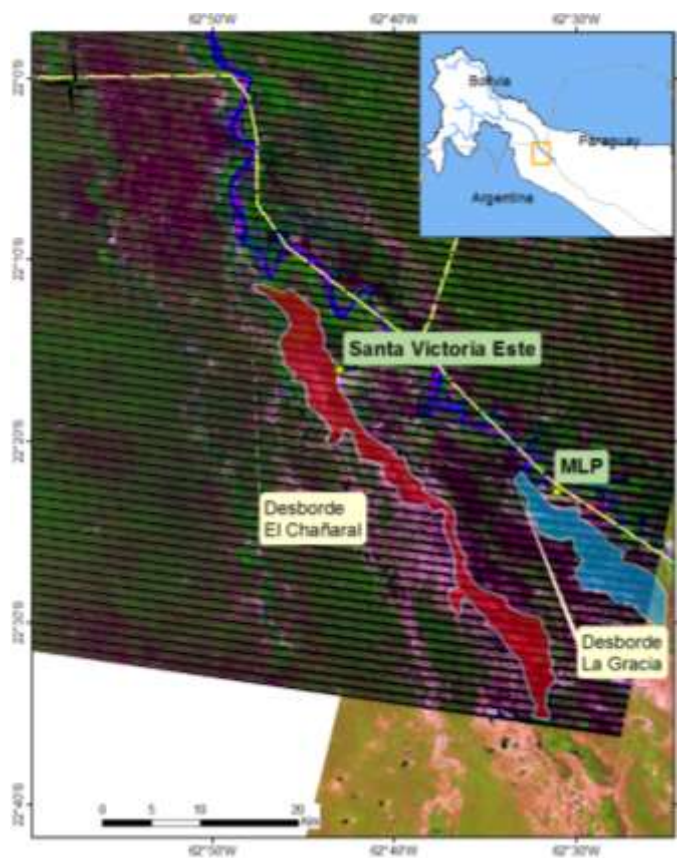


Figura 127.- Imagen 2008044 (13/02/2008).

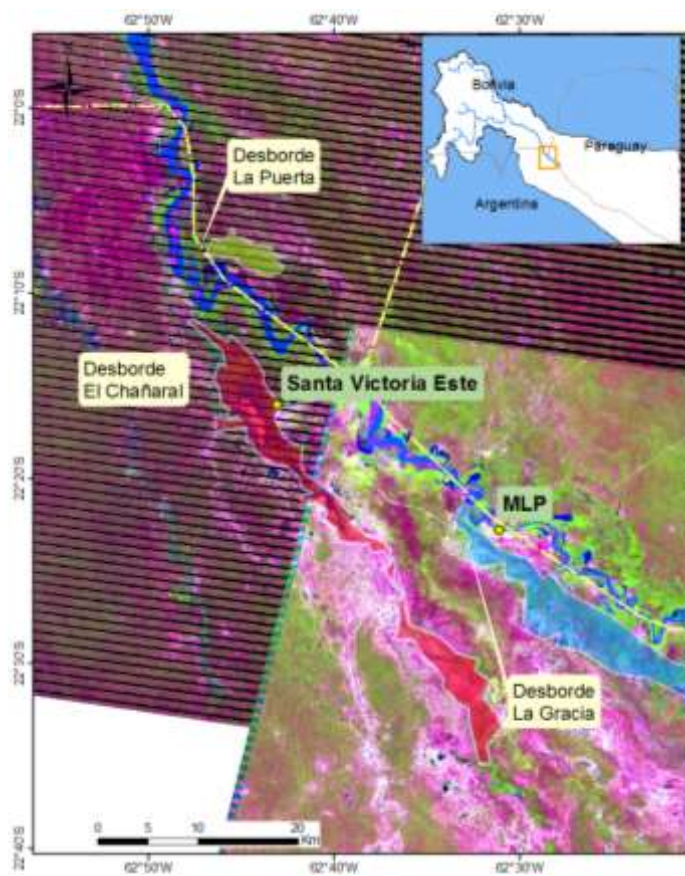


Figura 128.- Imagen 2008060 (29/02/2008).

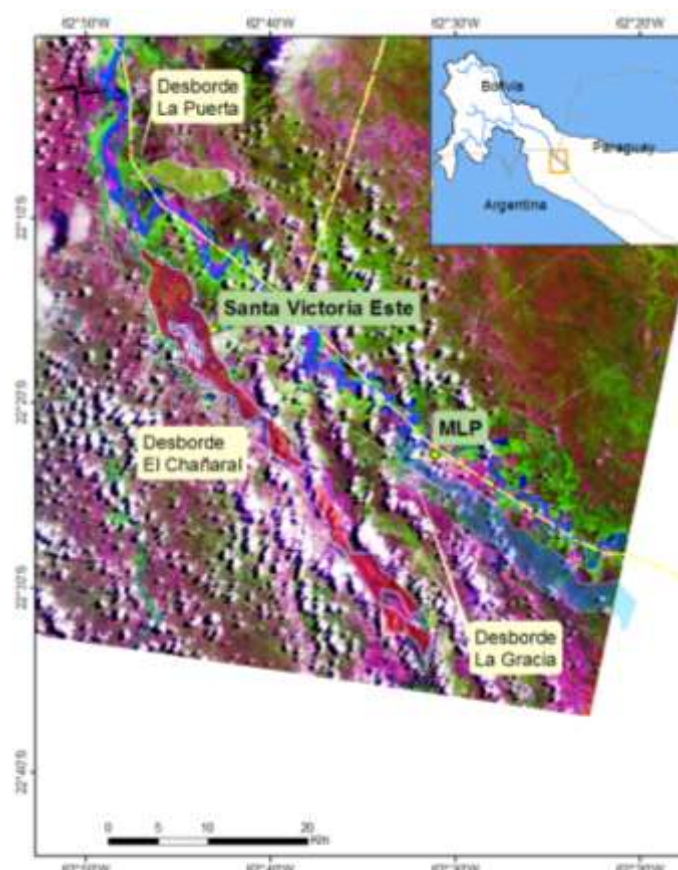


Figura 129.- Imagen 2008068 (08/03/2008).

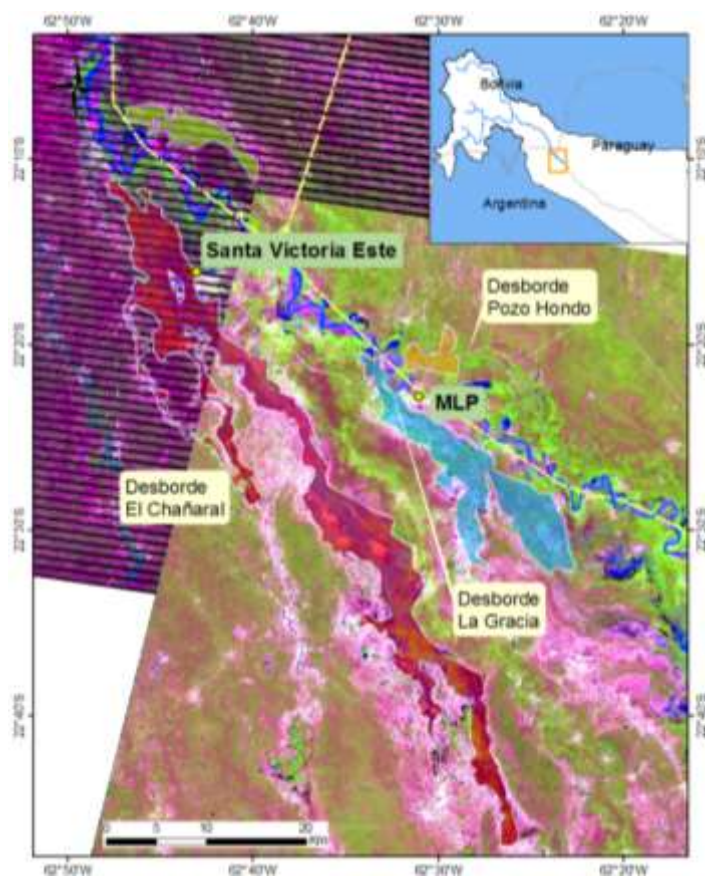


Figura 130.- Imagen 2008076 (16/03/2008).

Se observa en las imágenes del 5 de febrero y el 13 de febrero, que se han secado las áreas de los desbordes Pozo Hondo y La Puerta en 8 días, o 12 si se cuenta desde el paso del pico por MLP. A su vez se observa que El Chañaral ha disminuido un 23 %, en 36,1 km² (4,5 km² por día) y La Gracia un 55 % en 74,2 Km² (9,3 km²/día). Nuevamente se puede afirmar que en 12 días se han secado las áreas de La Puerta y Pozo Hondo.

Además entre el 14 y el 29 de febrero, con la imagen obtenida el día del pico del hidrograma de MLP, ha aparecido un área de desborde en La Puerta, desbordando antes que Pozo Hondo, el área de El Chañaral aumentó en 15 km² un 12 % y en La Gracia en 34 km² un 55 %. Ya para el día 16 de marzo, después de otro pico de crecida, ha desbordado "Pozo Hondo" lo que nos permitiría obtener una aproximación al caudal necesario para que éste se active una vez corregido el hidrograma.

6.2.2.1. Año 2009

Para este año se disponen de dos imágenes consecutivas del 3 y 4 de marzo. La diferencia de volúmenes entre el 27 de febrero y el 9 de marzo, pico del hidrograma, ha sido de $92,7 \text{ hm}^3$. El periodo de retorno calculado utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 para MLP es de 3,2 años. Se observa en la imagen del 4 de marzo (**Figura 133**) que ya casi no hay agua en el desborde La Gracia, por lo que se podría afirmar que en 24 hs se evacua el volumen almacenado en una superficie de 16 km^2 .

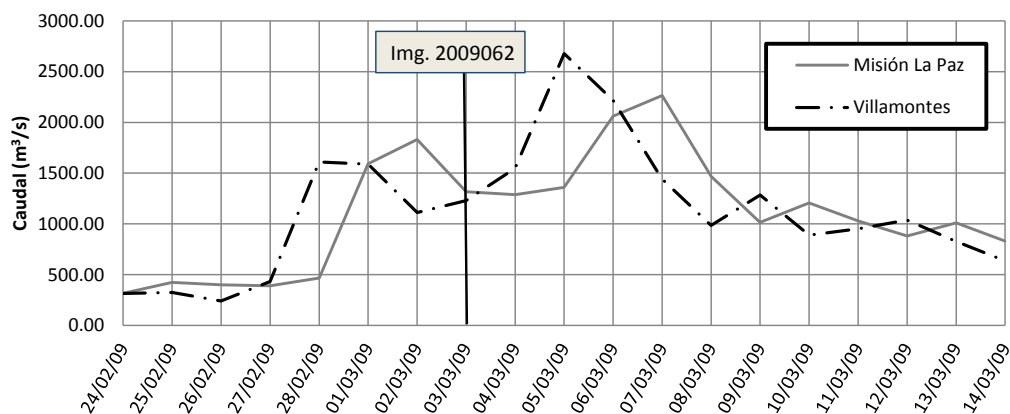


Figura 131.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2009.

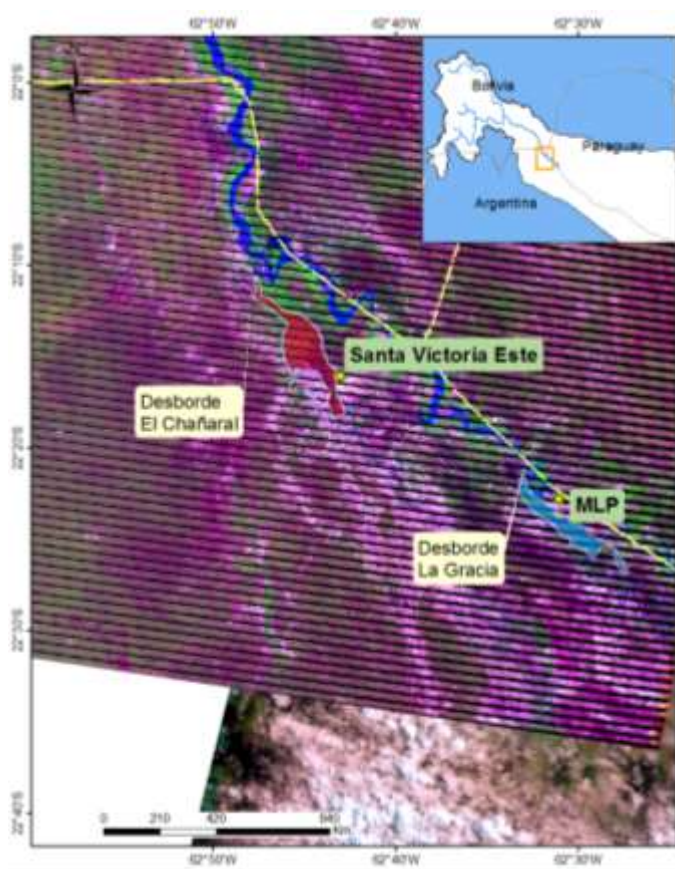


Figura 132.- Imagen Landsat 2009062 (03/03/2009)

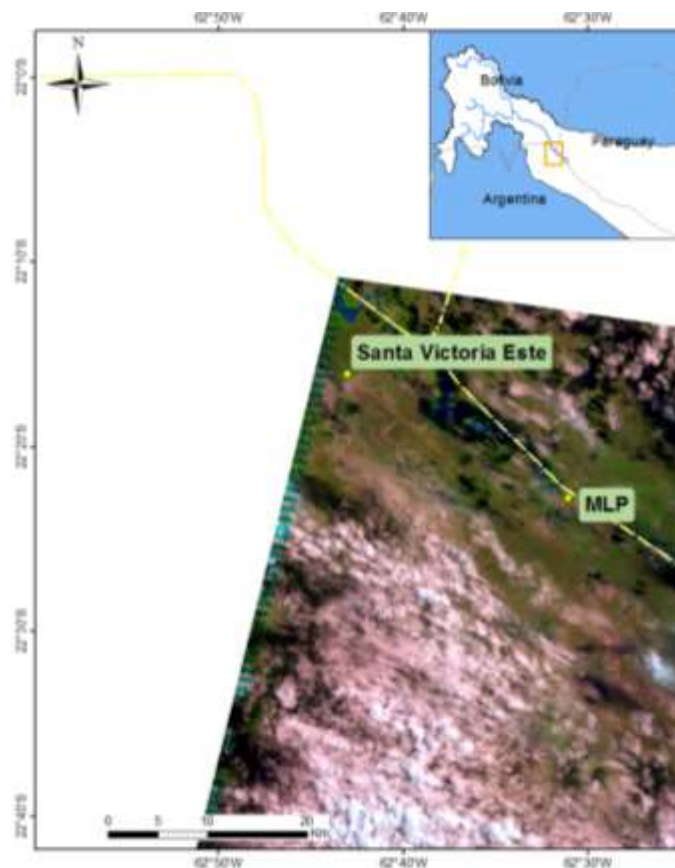


Figura 133.- Imagen Landsat 2009063 (04/03/2009)

6.2.2.2. Año 2013

Durante la crecida del año 2013 se llegó a un caudal en VM de 3860 m³/s. La imagen es de dos días después de cuando el pico de la crecida pasa por MLP. Se observan áreas inundadas en el Chañaral, La Gracia y Pozo Hondo, además de un nuevo desborde, no registrado en imágenes previas, 17 km aguas arriba de la Zona de Desborde La Puerta. Además en la zona de El Chañaral hay un brazo de desborde que no se ha observado antes tampoco en imágenes satelitales, y ha sido denominado “Bajada Grande”. Se ha computado una diferencia de volúmenes entre ambas estaciones de 285 hm³. El periodo de retorno, utilizando la ecuación propuesta en el Capítulo 4 es de 2,50 años para MLP.

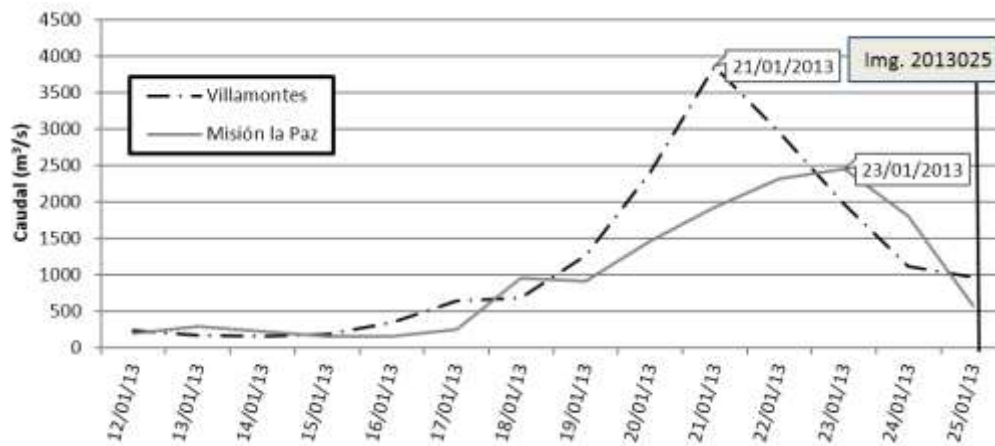


Figura 134.- Hidrogramas correspondientes a los desbordes del año 2013

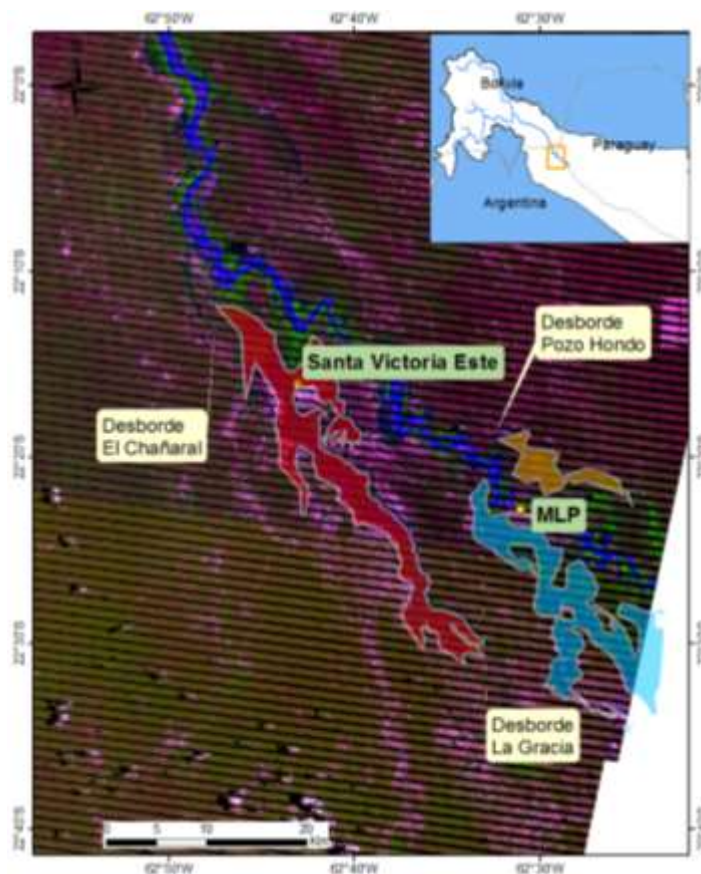


Figura 135.- Imagen 2013025 (25/01/2013).

6.2.2.3. Año 2014

Para el año 2014 se activaron los cuatro desbordes: El Chañaral, La Gracia, Pozo Hondo y La Puerta. El desborde La Puerta no pudo ser analizado por haber sombras de nubes en su zona de influencia.

El área inundada por El Chañaral para el día 5 de febrero fue de 114.19 km² con una longitud de 47.78 km y para el día 6 de febrero de 116 km² de superficie y 48.5 km de longitud. Se toma como longitud representativa del desborde la máxima extensión de la zona inundada. El pico de caudal fue de 3071 m³/s el 2 de febrero en VM y de 2137 m³/s el día 3 de febrero en MLP. Se observa el avance del frente del desborde El Chañaral que totaliza 3740 m en cerca de 14 horas, resultando en una velocidad de avance de 6.80 km/día. La presenta los desbordes activos.

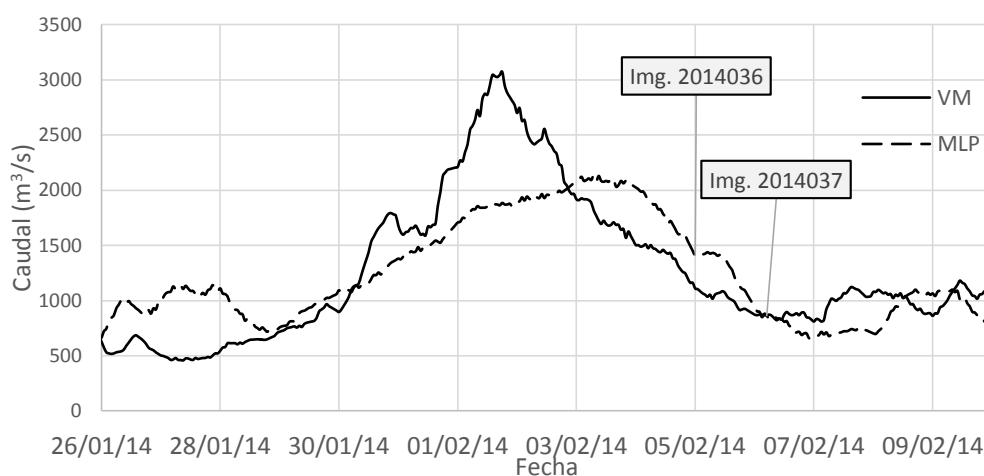


Figura 136.- Hidrogramas correspondientes a la crecida del año 2014

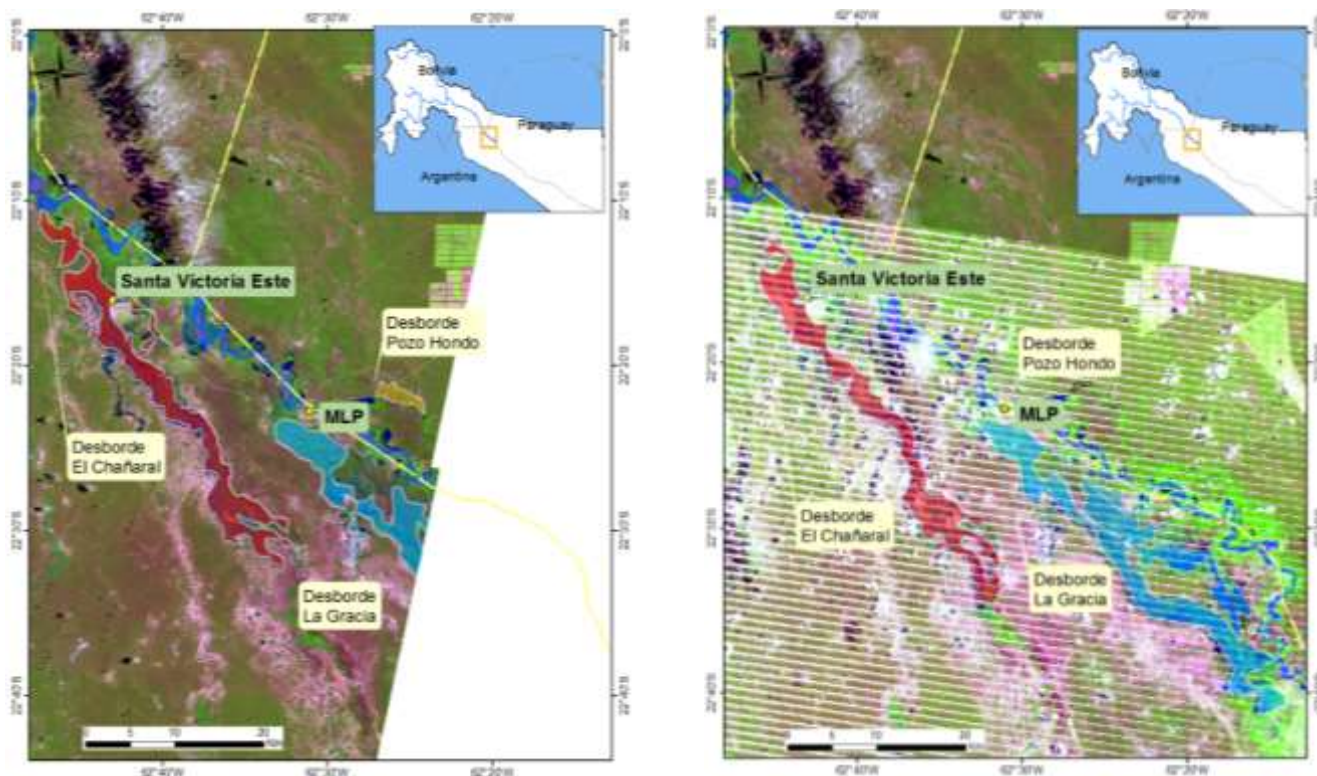


Figura 137.- Delimitación de desbordes, (Izq.) Imagen Landsat 8, 5/2/2014 Der.) Imagen Landsat 7, 6/02/2014

6.2.2.4. Año 2015

En el año 2015 se observa que se activaron los desbordes el Chañaral y La Gracia, de los otros dos desbordes no se posee información. Se obtuvo la imagen satelital del 17 de febrero que solo muestra información del desborde La Gracia (Figura 217).

El área inundada por el desborde La Gracia en el momento de la imagen fue de 112,3 km² y una longitud de 31,2 km. La diferencia de Volumen es de 255 hm³.

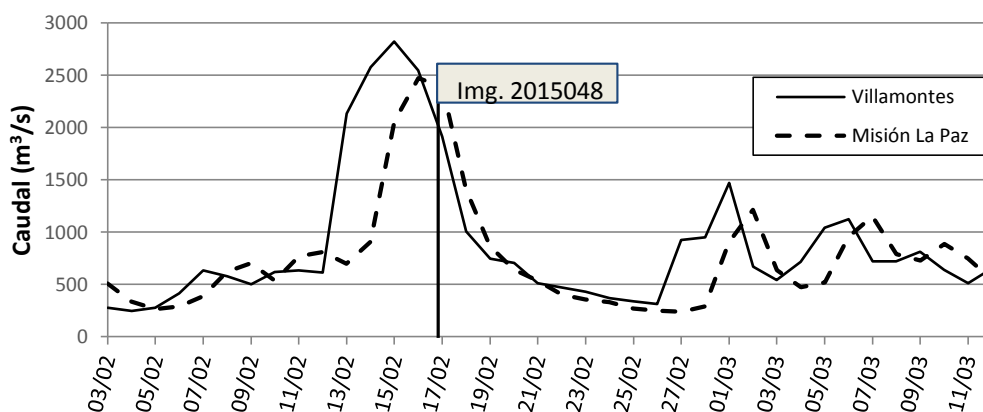


Figura 138.- Hidrogramas correspondiente a la crecida del año 2015

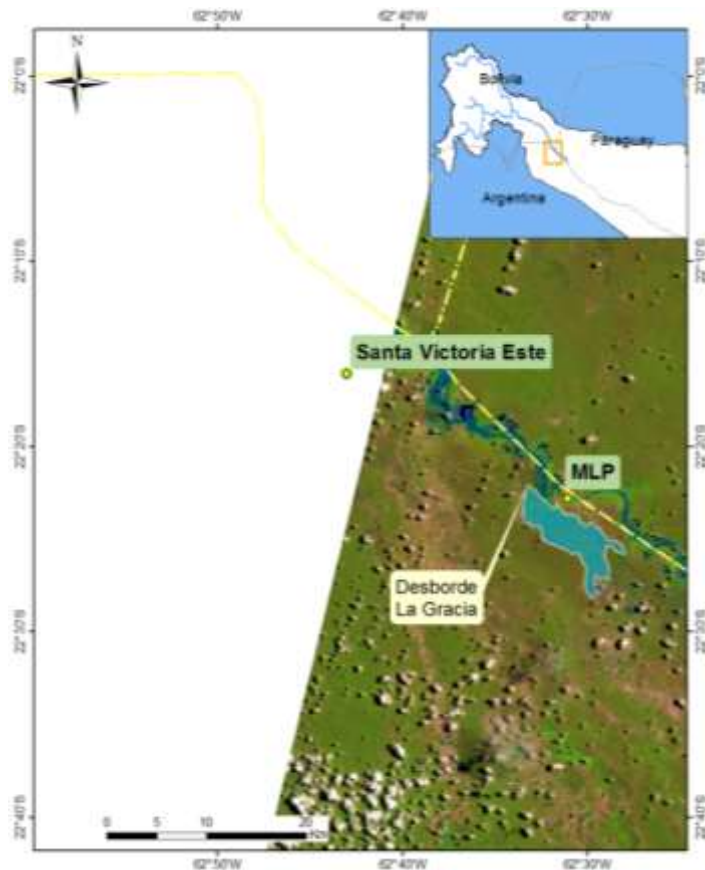


Figura 139.- Delimitación de desborde. Imagen Landsat 8, 17/2/2015

6.2.3. Análisis por localización de desbordes

6.2.3.1. Desborde El Chañaral

El desborde denominado El Chañaral es el más importante de los cuatro desbordes principales del tramo y desborda sus aguas hacia Argentina. Está localizado aproximadamente a los 22° 10' de Latitud Sur y 62° 47 ' de Longitud Oeste sobre margen derecha del río, en la provincia de Salta. Una vez activado predomina el sentido longitudinal en dirección N-SE. Es un desborde cuyas aguas no vuelven al cauce, el agua se pierde del sistema, lo mismo ocurre con los otros desbordes analizados.

Según el Modelo Digital de Terreno a partir de SRTM (Capítulo 6.1.2.1) este desborde se activa a la cota 273,85 msnm (Figura 140). Este desborde rodea la ciudad de Santa Victoria, que cuenta con un anillo de defensa. Otras poblaciones afectadas por este desborde son: Pozo El Tigre, La Ovejería, Monte Cristo, Chañares Altos, Amberes y Campo Largo.

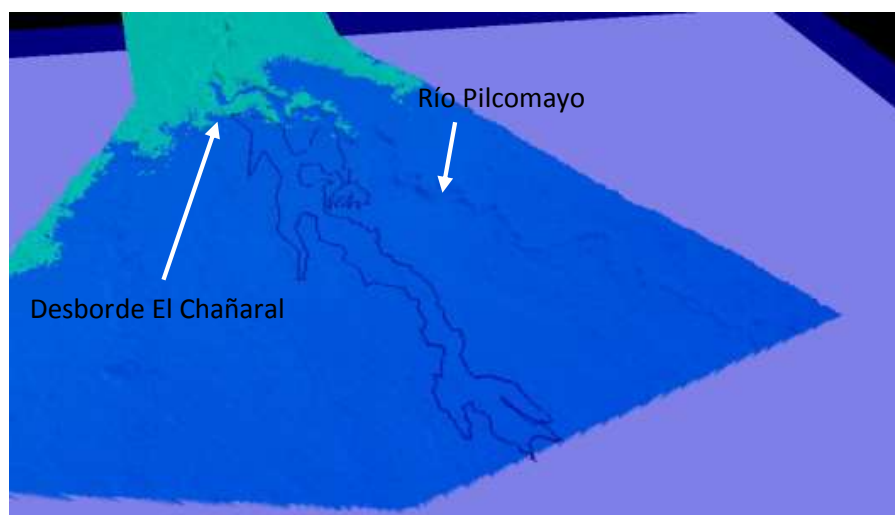


Figura 140.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de El Chañaral, 273 m.

El desborde El Chañaral es el primero en activarse de los cuatro desbordes principales y se activa para caudales de 2700 m³/s en Villamontes, que equivale a una lectura de 5,40 m en esta estación.

Se calculó la relación entre la velocidad de avance y los días transcurridos entre el primer caudal mayor a 2700 m³/s, para el que se activa el desborde en El Chañaral y la obtención de la imagen satelital. Por ejemplo, en 2013 la longitud de la mancha es de inundación es de 42 km y hay 5 días de diferencia entre el día que el caudal supera los 2700 m³/s (20/01/2013) y el día de la imagen (25/01/2013). La velocidad de avance es de 8,50 km/día. Una vez obtenida la velocidad de avance, que de la forma obtenida es una velocidad media para la ventana de tiempo, en este caso 5 días, se grafican las velocidades de avance vs el tiempo en el que se promedia obteniéndose la Figura 141.

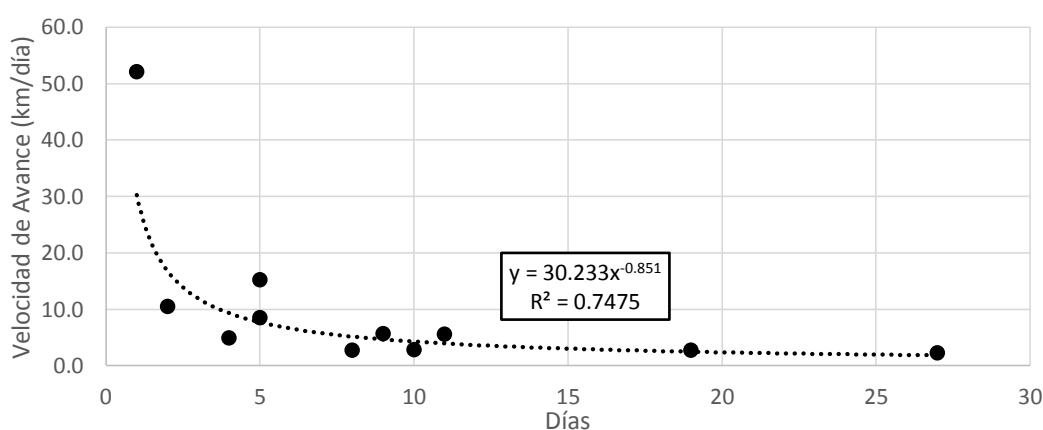


Figura 141.- Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, El Chañaral.

Se observa que la mancha cubre una gran longitud en poco tiempo los primeros días y luego comienza a avanzar con mayor lentitud. Esto se debe a que va aumentando la resistencia al movimiento y es un valor importante de entrada para trabajos futuros

donde se intentará modelar los desbordes. La ecuación que mejor representa este comportamiento para El Chañaral es

$$Vel = 30,233 l^{0,851}$$

Vel es la velocidad de avance y l la longitud de la mancha.

La Figura 142 muestra el desborde El Chañaral que escurre por un Megapaleocauce del Subcono Superior del Río Pilcomayo compuesto por depósitos aluviales de arena limos y arcillas.

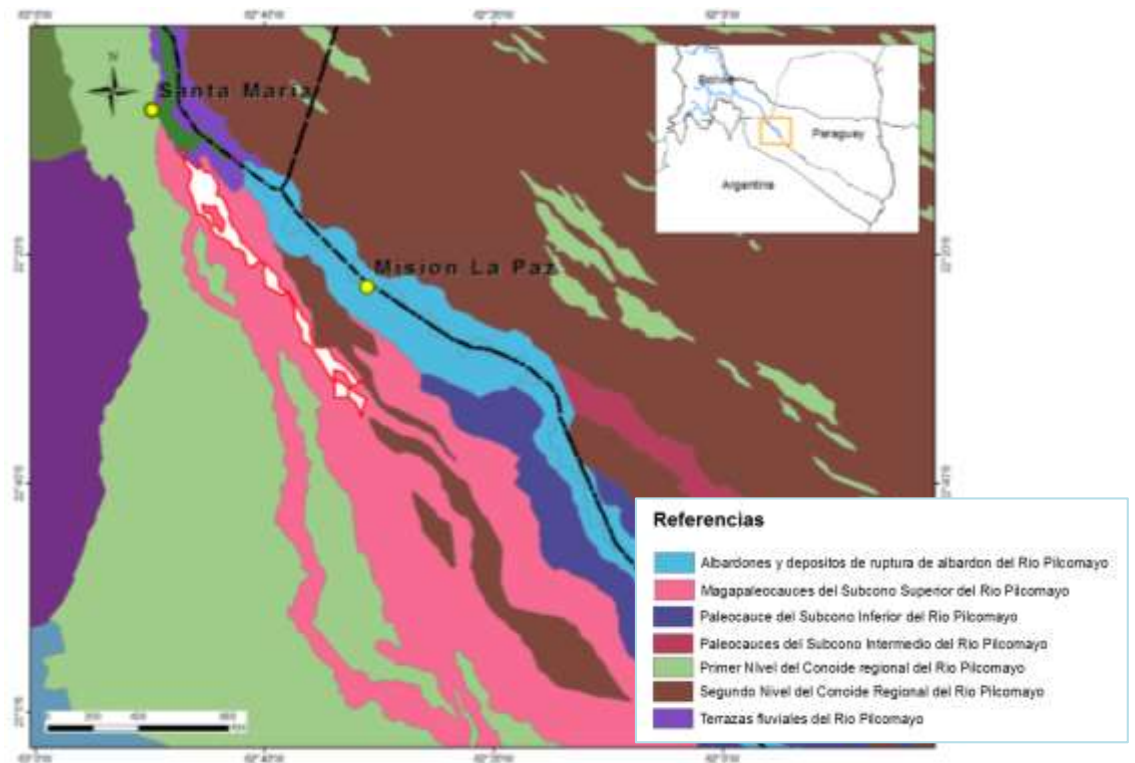


Figura 142.- Desborde El Chañaral (En blanco) sobre mapa de geomorfología (Halcrow & Serman, 2007)

6.2.3.2. Desborde La Gracia

El desborde la Gracia se encuentra a los 22° 22 ' de Latitud Sur y 62° 32 ' de Longitud Oeste sobre margen derecha del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia argentina, unos 5 km aguas arriba de MLP. Este desborde afecta principalmente a las poblaciones de Misión La Gracia, Misión La Paz y Las Vertientes y a su vez tiene influencia sobre la infraestructura como la Ruta Provincial N°58. La dirección predominante es N-SE. Se ha calculado con el MDT del SRTM que la cota a la que se activa este desborde es de 256 msnm.

El desborde La Gracia es el segundo en activarse y se activa a caudales mayores a los 2700 m³/s en Villamontes.

Este desborde tampoco retorna al cauce del Río Pilcomayo. No obstante en el año 2008, con un periodo de retorno calculado de 17 años, el desborde llegó a unirse al canal argentino en La Embocadura, alimentando después el Bañado La Estrella (Figura 143).

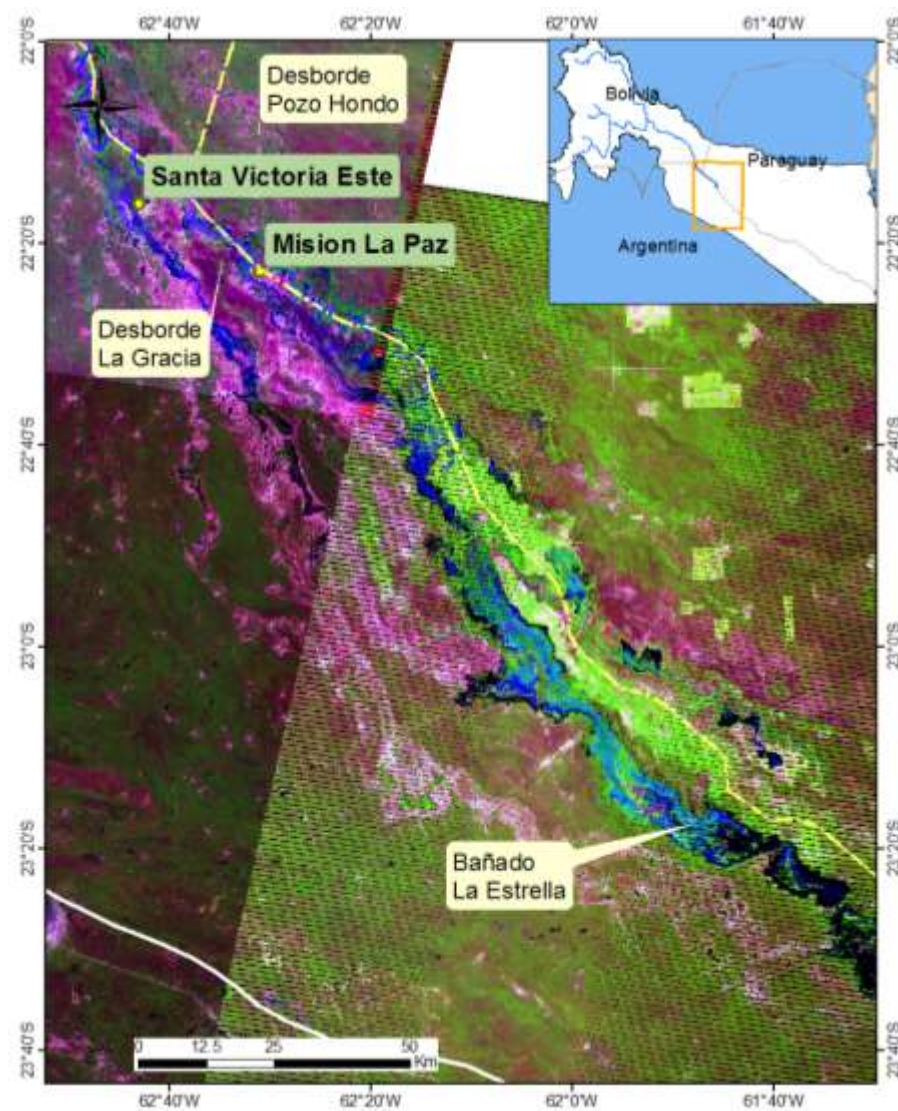


Figura 143.- Imagen Landsat 2008036, se observa que las aguas del desborde La Gracia arriban al bañado La Estrella

La Figura 144 presenta un modelo digital de terreno del desborde La Gracia del cual se obtuvo que la cota de desborde es de 256 m s.n.m.

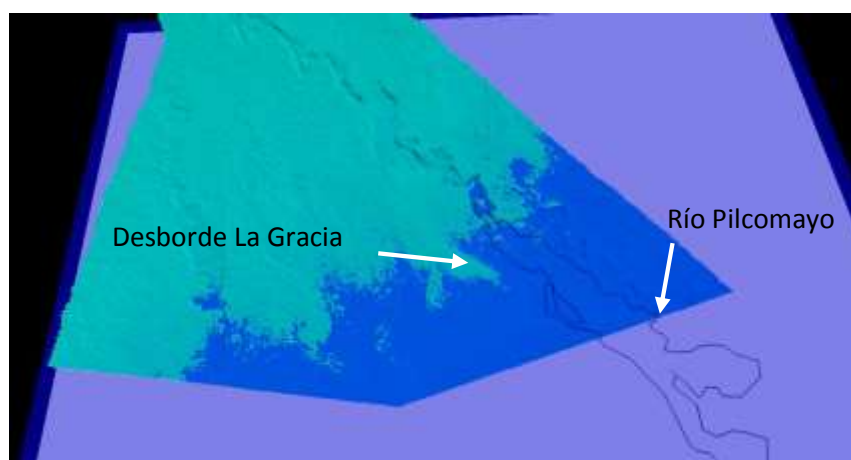


Figura 144.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde de La Gracia, 256 msnm.

Se graficó en la Figura 145 para el Desborde La Gracia la relación entre la velocidad de avance y los días transcurridos entre el primer caudal mayor a 2700 m³/s, para el que se activa el desborde en El Chañaral y la obtención de la imagen satelital. Se toma como referencia el Desborde del Chañaral, para simplificar la obtención de los resultados, no obstante La Gracia se activa para un caudal en VM un poco mayor. Se observa que la velocidad media de avance aumenta a medida que transcurren los días. Esto se corresponde con una situación dónde va disminuyendo la resistencia al flujo a medida que avanza. Esta información en principio no es comparable con lo que sucede con El Chañaral, por la diferencia en el orden de magnitud de las velocidades media de avance.

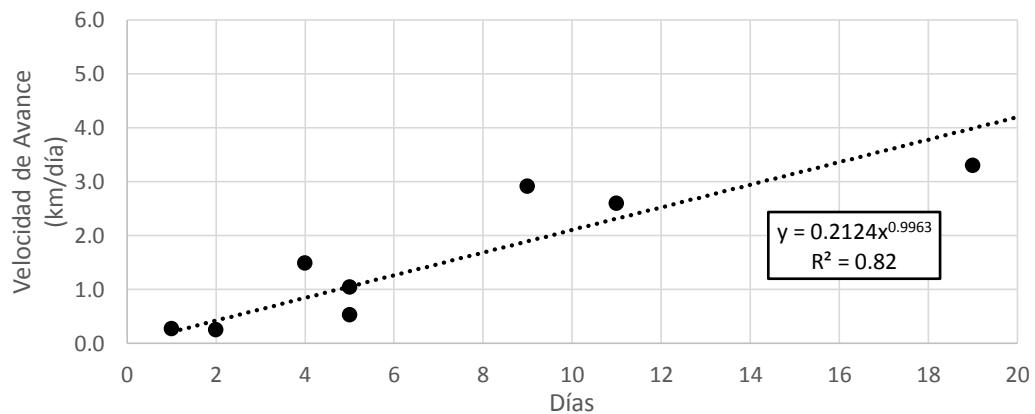


Figura 145.- Curva que relaciona la velocidad de avance con el tiempo entre que se origina el desborde y se obtiene la imagen satelital, La Gracia.

La ecuación que mejor representa este comportamiento para La Gracia es:

$$Vel = 0,2124 \, l$$

La Figura 142 muestra que el desborde La Gracia escurre por una zona de albardones y depósitos de roturas de albardones compuestos por arenas, limos y arcillas.

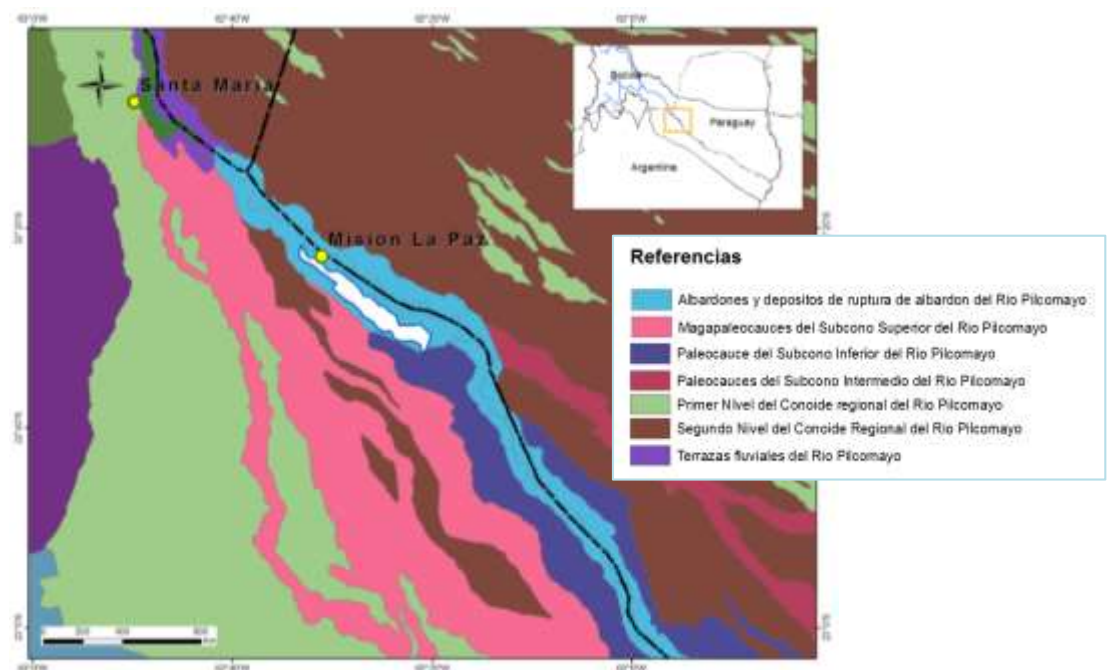


Figura 146.- Desborde La Gracia (En blanco) sobre mapa de geomorfología (Halcrow & Serman, 2007)

6.2.3.3. Desborde Pozo Hondo

El desborde Pozo Hondo se encuentra a los 22° 21 ' de Latitud Sur 62° 31 ' de Longitud Oeste sobre margen izquierda del Río Pilcomayo y desborda sus aguas hacia Paraguay, unos 6 km aguas arriba de MLP. La dirección predominante es E-SE orientándose hacia los 110° respecto al Norte.

El desborde Pozo Hondo se activa para caudales mayores a 3000 m³/s en la estación de Villamontes, equivalente a una lectura de escala de 5,80 m.

Este desborde afecta a la población de Pozo Hondo. A partir del Modelo Digital de Terreno de SRTM, se ha establecido su cota de desborde como 258 msnm.

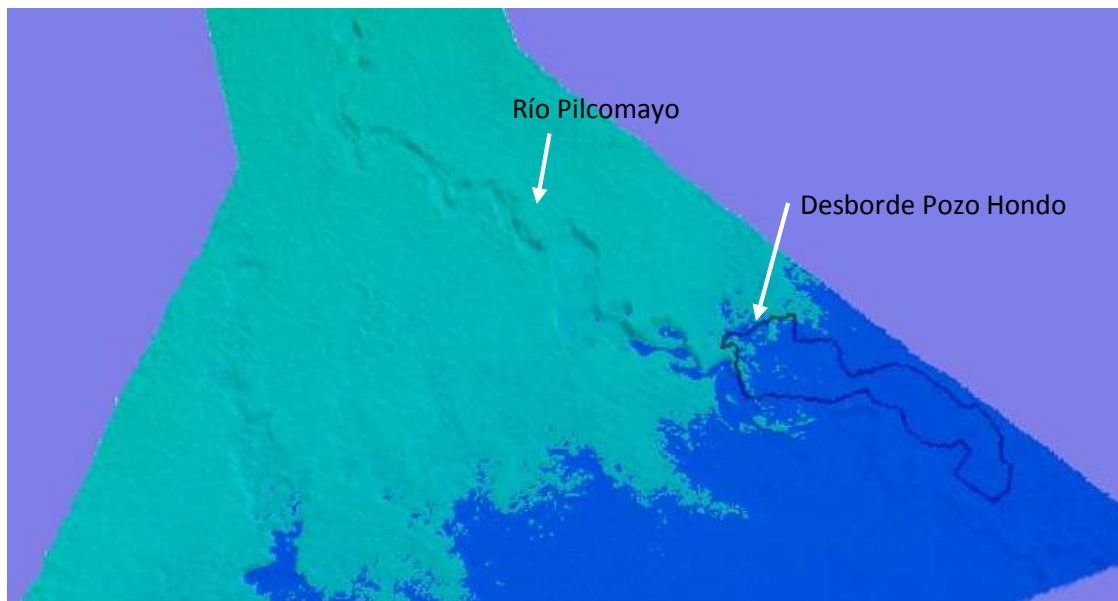


Figura 147.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde Pozo Hondo, 258 msnm.

6.2.3.4. Desborde La Puerta

El desborde La Puerta se encuentra a los 22° 07 ' de Latitud Sur 62° 45 ' de Longitud Oeste sobre margen izquierda del Río Pilcomayo y desborda sus aguas por margen izquierda hacia Bolivia, unos 47 km aguas arriba de MLP por el cauce o 37 km lineales. La dirección predominante es E-SE orientándose hacia los 110° respecto al Norte.

El desborde la Puerta se activa para caudales en VM próximos a los 3500 m³/s, equivalente a una lectura de escala 6,20 m.

Este desborde afecta a los parajes paraguayos de: La Victoria, Bañadero y Tuscal. A partir del Modelo Digital de Terreno de SRTM, se ha establecido su cota de desborde como 275 msnm (Figura 148).

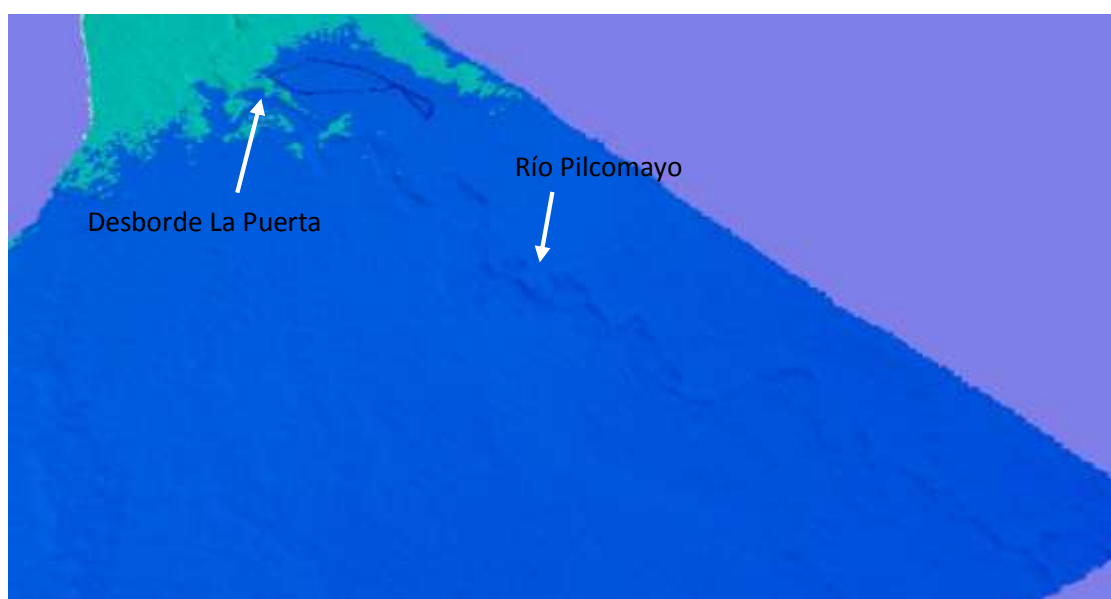


Figura 148.- Modelo Digital de Terreno SRTM, Cota de desborde La Puerta, 275 msnm.

6.2.4. Análisis integrado de desbordes

Se representaron en una misma figura todas las áreas inundadas por desbordes registradas, los que se presentan en la Figura 149. Se puede observar que las manchas son coincidentes para las diferentes crecidas. No obstante, se observaron 3 casos particulares. En el año 2008, una crecida con 17 años de periodo de retorno, el desborde el Chañaral inundó además del trayecto usual una porción al oeste. En el año 2013, representado en rojo en la figura, se observa que en la zona del Chañaral el Río Pilcomayo también desborda por margen derecha en una zona en la que no se tenía registro previo en la curva aguas abajo de la de El Chañaral. En el mismo año 2013 se observa que al Norte de La Puerta, en margen izquierda, a los 22° 00' de Latitud Sur y 62° 47 de Longitud Oeste, está activo un desborde que sólo había sido observado en la imagen satelital del año 2008 al que se ha denominado La Deseada, por una localidad en proximidad, y se ha marcado con color violeta. También se ha marcado el desborde la Garrapata en Amarillo.

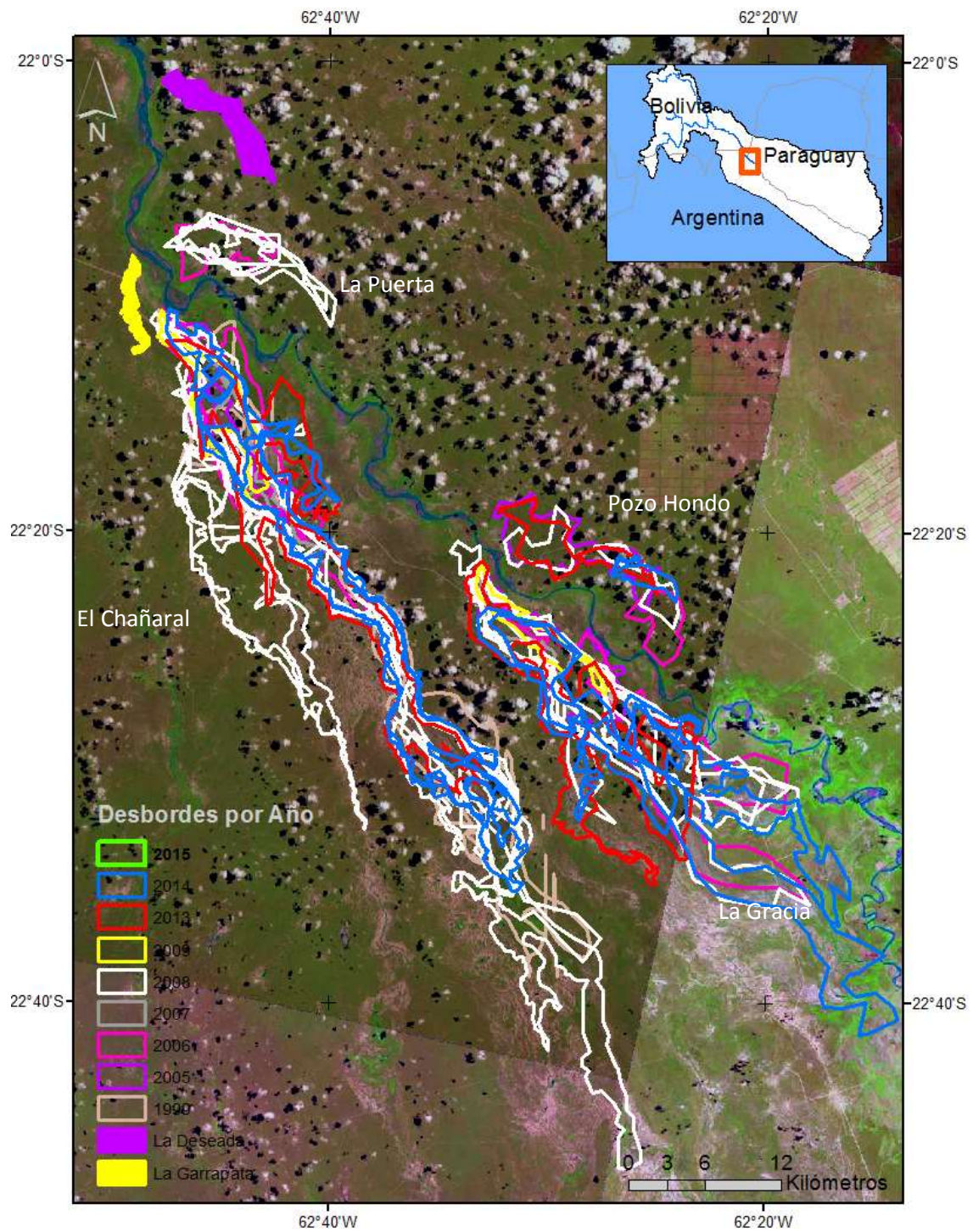


Figura 149.- Superposición de Desbordes.

La Figura 150 presenta la trayectoria de los distintos desbordes, obtenida como la suma de las diferentes manchas de inundación.



Figura 150.- Trayectoria de los Desbordes.

Se han graficado las áreas de las superficies inundadas por los desbordes versus los caudales tanto medio diario, como caudal pico en las estaciones VM y MLP sin encontrar una relación directa. En la Figura 151 se observa una de estas gráficas.

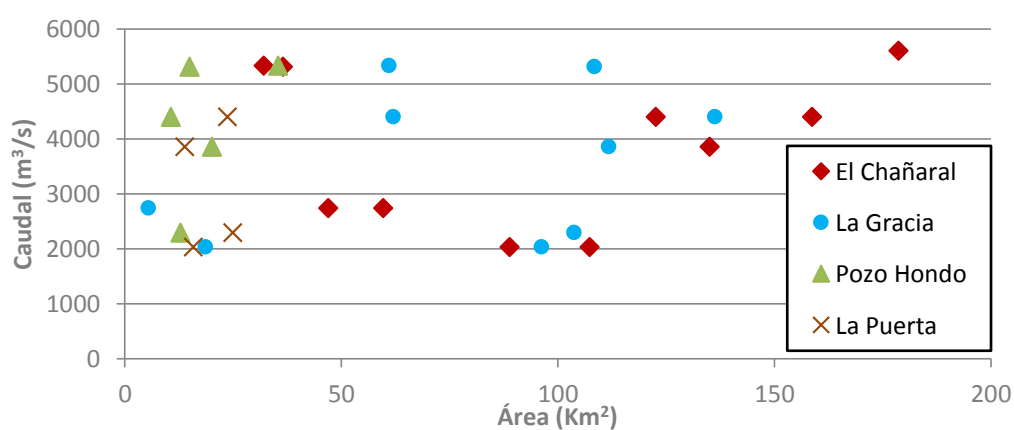


Figura 151.- Relación entre el área cubierta por los desbordes con los caudales pico en VM.

Hay una relación entre las áreas desbordadas y la longitud de cada una de estas que es válida para todos los desbordes, que se presentan en la Figura 152. La utilidad de esta figura reside en que una vez obtenida la longitud del desborde, por ejemplo de la Figura 141 y la Figura 145, luego con la velocidad de avance y días transcurridos desde el desborde, se obtiene el área inundada. Esta figura tiene validez para los cuatro desbordes estudiados.

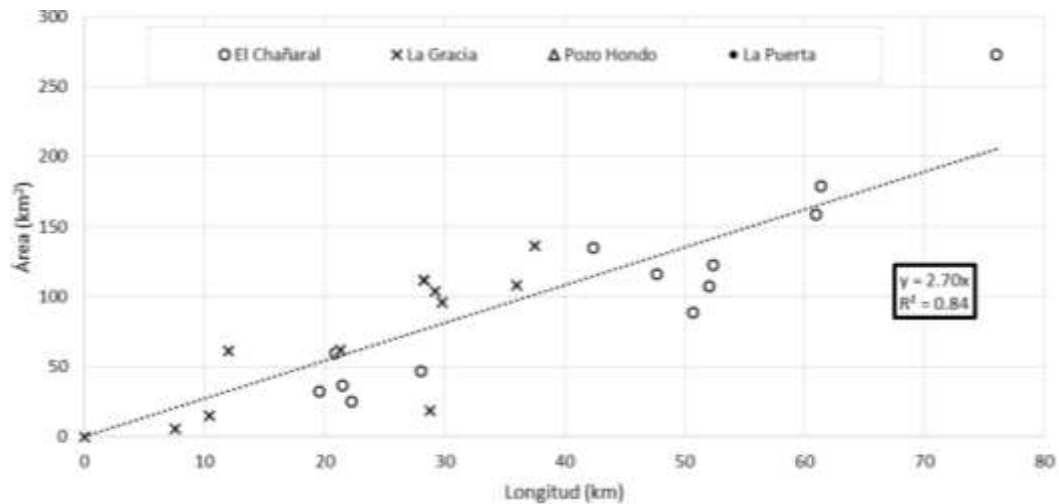


Figura 152.- Curva que relaciona longitud y el área anegada para los cuatro desbordes.

7. Modelación Numérica

El tránsito de caudales tiene como objetivo determinar el tiempo y la magnitud del caudal, es decir, el hidrograma en un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más puntos aguas arriba. Si el flujo es una creciente, el procedimiento se conoce específicamente como tránsito de crecidas. En un sentido más amplio, el tránsito de caudales puede considerarse como un análisis para seguir el caudal a través de un sistema hidrológico, dada una entrada. La diferencia entre el tránsito de sistemas agregados y distribuidos es que en un modelo de sistema agregado, el flujo se calcula como una función del tiempo únicamente en un lugar particular, mientras que en un sistema de tránsito distribuido el flujo se calcula como una función del espacio y el tiempo a través del sistema. El tránsito por métodos de sistemas agregados se conoce algunas veces como tránsito hidrológico, y el tránsito por métodos distribuidos se conoce como tránsito hidráulico (Chow, Maidment, & Mays, 1995).

Se ha desarrollado un modelo hidráulico unidimensional del tramo entre Villamontes y Misión La Paz con el objetivo de entender el funcionamiento del desborde. Es la primera vez que se modela todo el tramo y la información obtenida servirá para realizar estudios de mayor escala en la zona de los desbordes. Para caracterizar el flujo es indispensable contar con información hidráulica de referencia, niveles y velocidades distribuidos en la zona de desbordes y demás puntos de interés.

Se han desarrollado modelos hidrológicos para el tramo de estudio con el objetivo de analizar los resultados obtenidos con el modelo hidráulico, ya que son otros los parámetros utilizados. Se realizaron los modelos Muskingum, Muskingum-Kunge y de Onda Cinemática, que se han presentado en Testa Tacchino (2015)

7.1. Modelación Hidráulica Unidimensional

Se ha modelado hidráulicamente el Río Pilcomayo en una dimensión, a régimen no permanente, gradualmente variado y de fondo fijo utilizando el software HEC-RAS 4.1.0 (USACE, 2010). Esta modelación fue primeramente presentada en Testa Tacchino (2015).

El objetivo de la modelación es poder predecir el tiempo de arribo de la onda de crecida y niveles a MLP para ser utilizado en el sistema de alerta de crecidas, así como estudiar el mecanismo de funcionamiento de los desbordes. Se utilizaron las 62 secciones extraídas de los modelos digitales de terreno presentados en el capítulo anterior y se interpolaron cada 300 m. Se ha modelado con dos topografías diferentes, con MDT de SRTM y con MDT de ASTER, para analizar la sensibilidad a la geometría. En el tramo se presentan dos puentes, uno en Villamontes y otro en Misión La Paz que no se tienen en cuenta en el modelo.

HEC-RAS es un software de dominio público desarrollado del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center) del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), surge como evolución del conocido y ampliamente utilizado HEC-2, con varias mejoras con respecto a éste, entre las que destaca la interface gráfica de usuario que facilita las labores de pre y postproceso, así como la posibilidad de

intercambio de datos con el sistema de información geográfica ArcGIS mediante HEC-GeoRAS.

La Figura 153 presenta las secciones utilizadas junto a puntos de interés y la Tabla 24 muestra sus progresivas.



Figura 153.- Planimetría de las secciones creadas en HEC-RAS e identificación de localidades de interés.

Tabla 24.- Progresivas de puntos de interés

Localidad	Progresiva (m)
Villamontes	209634,5
Ibibobo	142601,6
Cuitaiqui	107398,5
Hito 1	91034,68
Desb. El Chañaral	70260,00
Misión La Paz	16006,11

7.1.1. Descripción General del Modelo

El software contiene cuatro módulos de análisis unidimensional de ríos: (1) Cálculos de lámina de agua de flujo a régimen permanente; (2) Simulaciones a régimen no permanente; (3) Transporte de sedimentos con lecho a fondo móvil y (4) Análisis de calidad de agua. Comprende además herramientas destinados al análisis de obras hidráulicas que sean emplazadas en el cauce.

El programa fue diseñado para resolver cálculos hidráulicos en una dimensión con régimen permanente para una red completa de cauces abiertos, canales, ya sean

naturales o artificiales, y ríos. HEC-RAS es capaz de calcular perfiles de la superficie del agua en flujos gradualmente variado tanto para condiciones permanentes como no permanentes. Resuelve flujos subcrítico, supercrítico y flujos mixtos.

En esta tesis se utiliza el módulo de régimen no permanente ya que el caudal varía en el tiempo, sometido a atenuación conforme la onda se desplaza aguas abajo, y las relaciones caudal-tirante calculadas no son únicas, tienen histéresis.

El módulo de cálculo en régimen variable de HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión, que consisten en un sistema de ecuaciones en derivadas parciales formado por la ecuación de continuidad y la de momentum. HEC-RAS utiliza el esquema de Preissmann o esquema de los cuatro puntos para la solución de las ecuaciones. Dicho esquema implícito en diferencias finitas es utilizado por varios programas comerciales. La Figura 154 presenta el proceso de cálculo que sigue el software HEC-RAS.

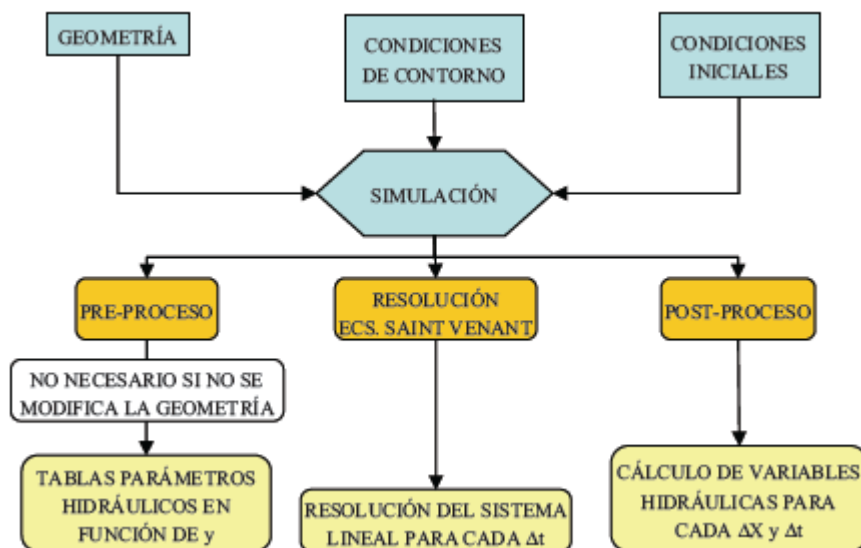


Figura 154.- Esquema del proceso de cálculo del Software HEC-RAS (Blade, Sánchez-Juni, Sánchez, Niñerola, & Gómez, 2009).

7.1.1.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se basa en el concepto que el flujo neto de agua en un volumen de control (balance del agua que sale y el que entra) es igual al volumen de agua almacenado.

7.1.1.2. Ecuación de momentum

La ecuación de momentum establece que la resultante de todas las fuerzas actuantes sobre un volumen de control es igual a la variación de la cantidad de movimiento en el mismo. Las fuerzas que tiene en cuenta son:

- Fuerzas de presión. Para su determinación establece la hipótesis básica de distribución hidrostática de presiones.
- Fuerza gravitatoria. En este caso supone como hipótesis fundamental que las pendientes de los cauces son suficientemente pequeñas. Normalmente se consideran pendientes pequeñas inferiores a 1v:10h.

- Fuerza de fricción. Para determinar las fuerzas de fricción con los contornos plantea el cálculo de la pendiente motriz a partir de la fórmula de Manning.

7.1.1.3. Esquema de Preissman

El esquema de Preissman también conocido como esquema de los cuatro puntos, es un esquema en diferencias finitas implícitas (Los métodos de diferencias finitas pueden clasificarse en diferencias finitas explícitas y diferencias finitas implícitas, dependiendo de si el proceso de encontrar la solución a lo largo del tiempo lo hacen punto por punto en la malla de discretización espacial del dominio, o bien resolviendo conjuntamente todos los puntos de la malla en cada instante). En la Figura 155 se muestra el esquema de cálculo de los cuatro puntos de Preissman, dónde se aprecia el significado físico del factor de ponderación θ , que utiliza HEC-RAS, y que da el grado de implícitud para la estimación de las diferencias finitas.

Así, se demuestra que un esquema implícito es intrínsecamente estable cuando $0,5 < \theta < 1,0$, es condicionalmente estable si $\theta = 0,5$ e inestable para $\theta < 0,5$. HEC-RAS tan solo permite trabajar con factores $0,6 < \theta < 1,0$, por lo que en este caso el esquema será básicamente estable.

De cualquier modo hay que tener en cuenta que existen otros factores que influyen en la inestabilidad, como son:

- Cambios bruscos de pendiente
- Características de la propia onda de avenida
- Presencia de estructuras complejas (puentes, pasos entubados, motas, etc.)

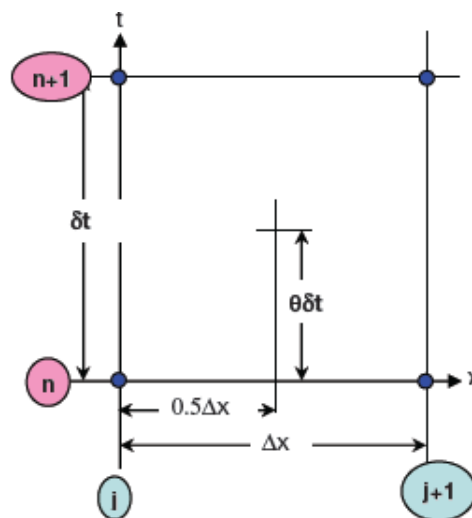


Figura 155.- Esquema de cálculo de Preissman de los cuatro puntos .

7.1.2. Datos de Entrada

Se ha modelado el tramo comprendido entre Villamontes y Misión La Paz. Como ya se ha referido, se poseen aforos en VM y MLP. En la Figura 156 se presentan las curvas H-Q. Recordemos que la sección de MLP es muy inestable, por lo que la curva se calculó a partir de aforos durante la crecida. Otra de las restricciones es que no se poseen aforos para caudales elevados en ninguna de las dos estaciones. Actualmente no se puede establecer

con certeza cuales son los caudales máximos alcanzados en VM. En este caso para Villamontes se utiliza la curva H-Q histórica.

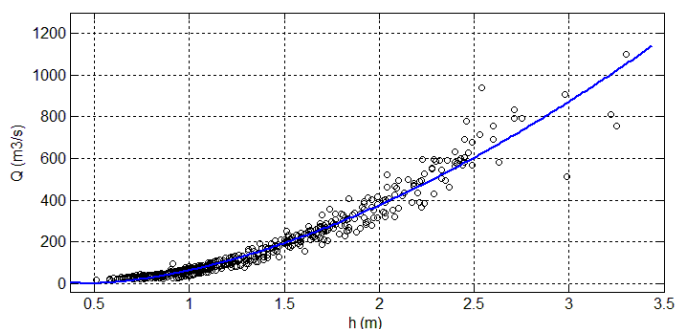


Figura 156.- H-Q para VM (1973-2013) $Q = 187,1 (H - 0,48)^{5/3}$, $R^2 = 0,95$

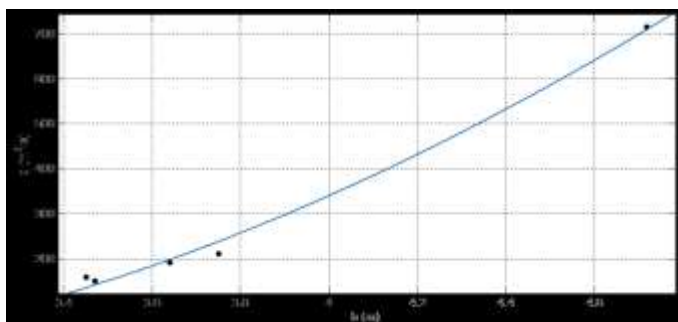


Figura 157.- H-Q para MLP (2013) en Rama Ascendente $Q = 180,4(H - 2,167)^{5/3}$, $R^2=0,98$

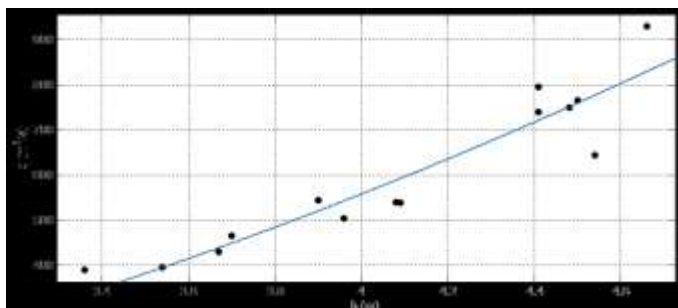


Figura 158.- H-Q para MLP (2013) en Rama Descendente $Q = 124,10(H - 1,535)^{5/3}$, $R^2=0,87$

Como condición de aguas arriba se impone un hidrograma de crecida en Villamontes, en el caso que se presenta, la del año 2013 (Figura 159) obtenido a partir de lecturas de escala horarias y su respectiva curva altura-caudal. El periodo de modelación es desde el 9 de enero de 2013 a las 0:00 hs hasta el 29 de enero de 2013 a las 23:00 hs, este periodo es mayor al de la crecida para garantizar un ascenso de niveles de agua gradual que brinda más estabilidad al modelo. A su vez, se rellenó la serie dónde se encuentran datos faltantes para no tener saltos a caudal cero.

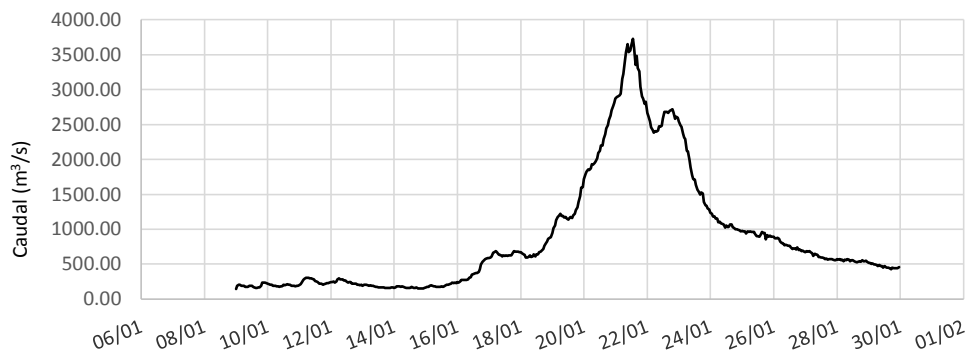


Figura 159.- Condición de Entrada Aguas Arribas, Hidrograma de Crecida del año 2013.

El flujo es subcrítico en todo el tramo y tiempo de modelado, por lo que se requiere agregar al modelo la condición de borde aguas abajo. Se ha decidido colocar un tirante normal para pendiente de 0,4 ‰ en una sección 15 km aguas abajo de Misión La Paz.

Otra particularidad es que en el tramo VM-MLP ocurren diversos desbordes que regulan el caudal que arriba a MLP. Estos desbordes se modelaron en la segunda corrida con un vertedero lateral en la zona de desborde de El Chañaral (progresiva 70260 m), que produce el efecto de eliminar caudal del sistema (Figura 160).

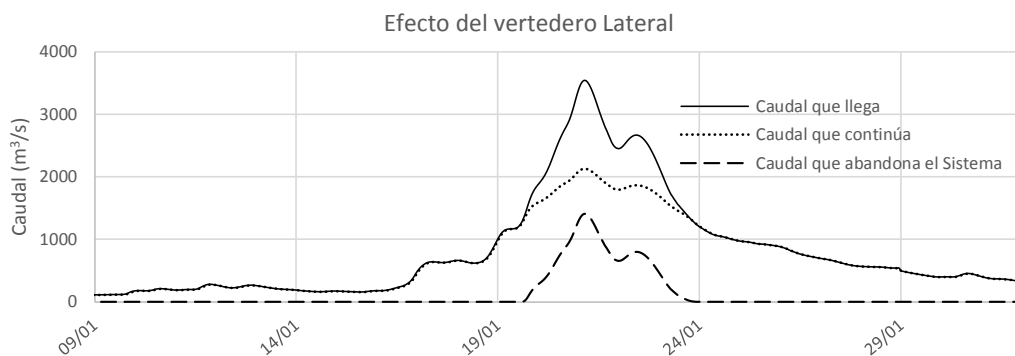


Figura 160.- Efecto del vertedero lateral en la modelación 1D.

Se cuenta dentro de los antecedentes el trabajo de (Corral, 2010) que presenta un modelo unidimensional para el tramo comprendido entre Hito 1 y Misión La Paz. Este modelo fue calibrado con las manchas de inundación que se pueden identificar a partir de la utilización de imágenes satelitales. La Figura 161 muestra la superposición de la mancha de inundación proporcionada por el modelo, en celeste, y la obtenida por análisis de la imagen satelital, en rojo.

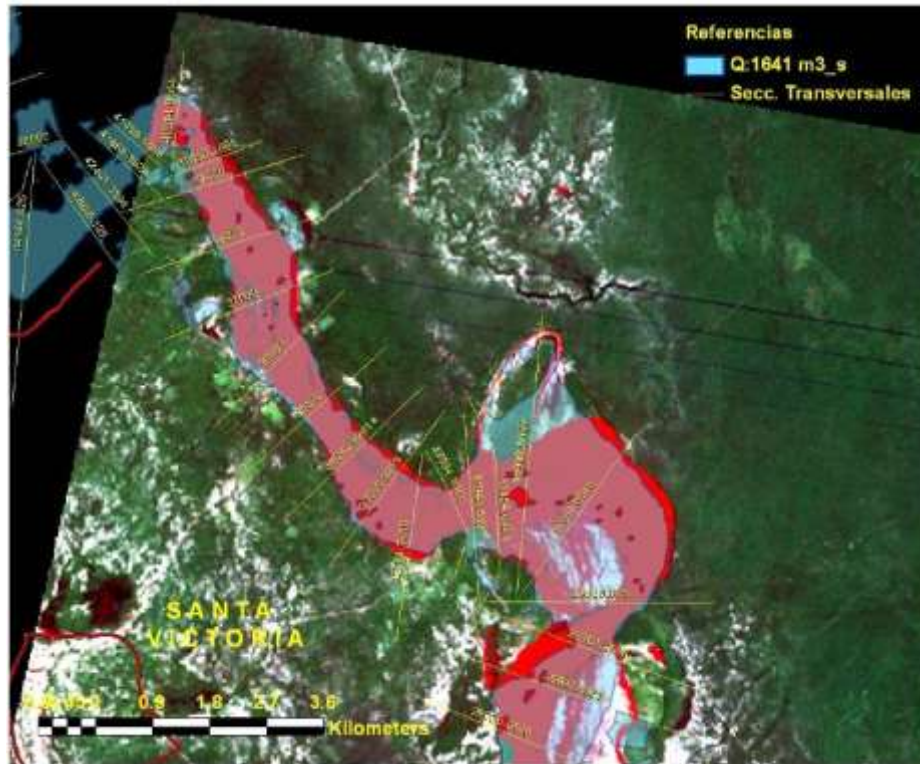


Figura 161.- Calibración de modelo unidimensional con imágenes satelitales (Corral, 2010).

El hidrograma obtenido a partir de las lecturas de escala horarias en MLP y las respectivas curvas altura-caudal se utiliza para calibrar y observar la calidad de los resultados (Figura 162). Este hidrograma cumplirá la función de hidrograma observado en la sección de MLP.

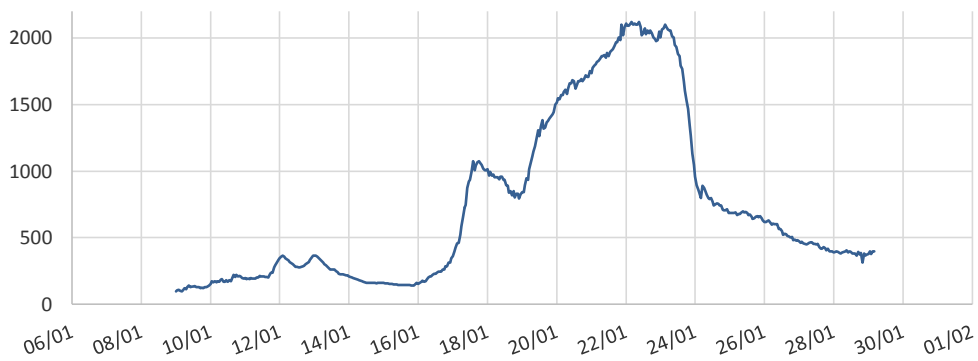


Figura 162.- Hidrograma Observado en MLP.

7.1.2.1. Estabilidad del Modelo

La simulación en régimen variable está sujeta a inestabilidades que consisten en errores numéricos que pueden crecer hasta el punto que la solución empieza a oscilar incontroladamente o hasta que los errores se hacen tan grandes que el cálculo no puede continuar.

Los siguientes factores pueden influir en la estabilidad de la simulación (Blade, Sánchez-Juni, Sánchez, Niñerola, & Gómez, 2009):

$\Delta x \rightarrow$ los tramos con pendientes mayores suelen requerir Δx menores ($\Delta x < 30$ m) mientras que si aparecen pequeñas pendientes, por ejemplo en ríos grandes y muy uniformes, son aceptables Δx alrededor de los 300m.

$\Delta t \rightarrow$ se debe establecer la condición de Courant: $v_w \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \approx f \cdot \frac{Q}{A} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$. Esta condición permite imponer un criterio de selección de Δt , teniendo en cuenta que $f = 1,50$ para sección natural. De cualquier modo, en la práctica Courant suele ser una condición bastante restrictiva. Si T_p es el tiempo del pico del hidrograma de la crecida, en general, se sugiere: $\Delta t \leq \frac{T_p}{20}$.

$\theta \rightarrow \theta = 1$ da estabilidad (valor de HECRAS por defecto), mientras que $\theta = 0,60$ da exactitud en la estimación de la derivada.

Número de iteraciones \rightarrow El programa en cada instante estima las derivadas y resuelve las ecuaciones. Así, en todos los nodos de cálculo (en cada sección transversal) se comprueba el error, de manera que si éste es mayor que la tolerancia, el programa procede a realizar una nueva iteración. El número de iteraciones por defecto que utiliza HEC-RAS es de 20, permitiendo un máximo de 40.

Tolerancia de la solución \rightarrow Modificar la tolerancia puede repercutir sobre la estabilidad de la simulación, de manera que si se aumenta la tolerancia de cálculo, se puede reducir la estabilidad, en cambio, si se reduce la tolerancia, el programa precisará de un mayor número de iteraciones para converger, pudiéndose dar el caso de que el máximo número de iteraciones fijado no sea suficiente para garantizar la convergencia del sistema.

Las opciones de cálculo y tolerancias utilizadas se presentan en la Figura 163. Para intentar que el modelo sea más estable se siguieron las siguientes pautas (Rubín Marín, 2006):

1. Distancia entre secciones transversales: a menor distancia entre secciones mayor estabilidad del modelo a costa de más tiempo de cálculo. Se utilizó una separación máxima de 300 m entre secciones interpoladas
2. Intervalo de cálculo: a menor tiempo mayor estabilidad y mayor tiempo de cálculo, 6 min en el caso planteado.
3. Periodo de "Warm up" (Run \rightarrow Unsteady Flow Analysis \rightarrow Options \rightarrow Calculation Options and Tolerances): consiste en una aproximación a la solución final mediante una simulación previa en régimen permanente. Esta es una herramienta muy útil para conseguir un modelo estable. Se utilizó el máximo permitido por el software

4. Local Partial Inertia (LPI): HEC-RAS incorpora el tratamiento para resolver inestabilidades provocadas por la onda de choque en su formulación mediante el Local Partial Inertia (LPI); este método incluye en su formulación el factor “Exponent for Froude number reduction factor” (factor m), un valor de $m=1$ dará resultados lo más estables posible, para modificarlo se debe seguir la siguiente ruta: Run→Unsteady Flow Analysis→Options→ Mixed Flow Options. Este factor es muy importante para conseguir un modelo estable.
5. “Theta weighting factor”→ Es un factor de ponderación que se aplica a las ecuaciones en diferencia finitas usadas para el cálculo en régimen variable para conseguir un modelo más estable. Se puede fijar el valor de este factor entre 0,6 y 1. Un valor de 1 dará resultados lo más estables posible y un valor de 0,6 dará resultados lo más precisos posible. Es aconsejable comenzar la simulación con factor de 1 y luego ir bajando; si el resultado no varía es mejor dejar el valor de 1 para que el modelo sea lo más robusto posible. Se utilizó 0,6
6. En el menú que aparece entrando por Run→Unsteady Flow Analysis→Options→ Calculation Options and Tolerances se encuentran el resto de parámetros que se pueden modificar para intentar estabilizar el modelo, todas ellas afectan en gran medida la precisión en el perfil de lámina de agua que se quiere obtener. En este caso se eligió 10 cm de precisión de lámina.

Figura 163.- Opciones de Cálculo y Tolerancias utilizadas para modelar.

Se tuvieron en cuenta los diversos mecanismos que dispone HEC-RAS para detectar posibles problemas de estabilidad numérica durante su ejecución (Blade, Sánchez-Juni, Sánchez, Niñerola, & Gómez, 2009):

- En el caso de que durante el cálculo el programa detecte algún problema, el programa se para durante la ejecución e indica un error de cálculo o que la matriz de solución se ha vuelto inestable.

- El programa indica cuando alcanza el máximo número de iteraciones para diversos intervalos de cálculo Δt , aunque éste no siempre es un problema de estabilidad.
- En caso de que termine la simulación, la inspección gráfica de los resultados permitirá apreciar la existencia, o no, de oscilaciones en los calados y caudales calculados. Dicha oscilación, en caso de existir, es fruto de inestabilidades numéricas.

Además, se planteó un análisis de sensibilidad numérica, que consiste en ajustar los parámetros para obtener la mejor solución a las ecuaciones de Saint Venant manteniendo la estabilidad del modelo. Así, se analizaron los siguientes aspectos:

- Se fijó el intervalo de tiempo de cálculo (Δt) tendiendo al menor valor que asegure la estabilidad del sistema.
- El parámetro de ponderación espacial de la derivada (θ) se llevó gradualmente al valor 0,60.
- Se analizaron los resultados para distintos valores alrededor del coeficiente de rugosidad de Manning fijado ($n=0,017$; $n=0,018$; $n=0,023$; $n=0,0375$)
- Se analizaron los resultados para distintos espaciamientos (Δx), usando la herramienta de interpolación de secciones y analizando los resultados para la mitad del espaciamiento fijado ($\Delta x/2$), verificando que los resultados no variaban.

7.1.2.2. Coefficiente n de Manning

Se cuenta con valores del coeficiente de Manning utilizados en trabajos de modelación numérica de otros autores en diferentes tramos del río. Baldissone (2013) propuso $n=0,018 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para un tramo aguas abajo de MLP conocido como la Embocadura, sistema distribuidor de las aguas entre Argentina y Paraguay, este tramo fue modelado en HEC-RAS con el módulo permanente y luego utilizado para la calibración de un modelo bidimensional. J. D. Brea, y otros (2014) propusieron para la misma zona dos condiciones de rugosidad diferentes para las planicies y para la zona del cauce y las canalizaciones. Para caracterizar la primera se adoptó un coeficiente n de Manning igual a $0,030 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, mientras que en la zona del cauce la rugosidad se adoptó variable, con un valor medio de $0,023 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para una crecida con pico de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ y para una crecida de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ coeficientes n de Manning igual a $0,025 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ para planicies, mientras que en la zona del cauce la rugosidad se adoptó variable, con un valor medio de $0,023 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Cafaro y Ramonell (2007) para el tramo comprendido entre Hito 1 y Misión La Paz utilizaron los coeficientes de rugosidad de Manning que se presentan en la Tabla 25, valores obtenidos a partir de despejar el coeficiente de la ecuación de Manning con datos de levantamientos del año 2001, valores para n que van desde $0,010 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ a $0,031 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Corral (2010) utilizó los valores de rugosidad presentados por Cafaro y Ramonell (2007).

Tabla 25.- Coeficientes de Rugosidad de Manning (Cafaro & Ramonell, 2007).

Sección	S_n	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	n_1	n_2
CP20	0,00050	0,65	0,65	0,0188	0,0313
CP19	0,00049	0,90	0,90	0,0151	0,0100
CP13	0,00030	1,40	-	0,0105	-

Referencia

Caudal usado 83,13 m³/s, valor medio del mes de noviembre de 2001

S_n : pendiente del pelo de agua del río

v_m : velocidad media de la sección obtenida con la ecuación de Manning

n : coeficiente de rugosidad de Manning

$_1$: canal de mayores dimensiones en estiaje

$_2$: canal de menores dimensiones en estiaje

A partir de datos obtenidos en campañas en las que participó el autor se calculó el coeficiente de rugosidad de Manning para la sección de MLP con resultados entre 0,037 m^{1/3}/s y 0,057 m^{1/3}/s (Tabla 18). En el modelo matemático se probaron diferentes valores del coeficiente de Manning y se compararon los resultados de las simulaciones con los valores observados en MLP. A la luz de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta todas las incertidumbres: Modelo 1D con topografías satelitales a fondo fijo y sin transporte de sedimentos; el río durante las crecidas tiene una elevada concentración de sedimentos y arrastra material vegetado con una gran variabilidad en la cota del lecho, curvas alturas-caudal con incertidumbres para lecturas de escala elevadas, entre otros. Se ha considerado que los resultados con $n=0,023$ m^{1/3}/s representan los que mejor se ajustan con los hidrogramas de los aforos. Se verá más adelante, en los modelos de Onda Cinemática y Muskingum-Cunge, que los valores del n de Manning son diferentes al valor que nos da la calibración del modelo hidráulico. El mismo parámetro físico “rugosidad” con valores diferentes según el modelo empleado indica que no se comporta solamente como parámetro físico, sino que también posee un comportamiento de parámetro numérico.

La Figura 164 presenta los hidrogramas que llegan a MLP para diferentes coeficientes de Manning utilizados en el modelo con vertedero lateral.

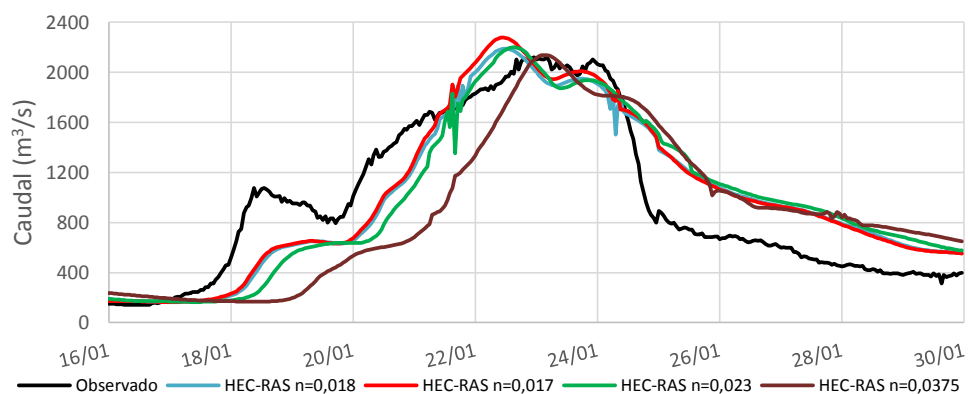


Figura 164.- Comparación de Resultados de la Modelación con diferentes n de Manning, SRTM.

También se calculó el coeficiente n de Manning para la sección de Misión La Paz a partir de formulaciones del tipo: $V = a_0 \cdot d^{a_1} \cdot R^{a_2} \cdot S^{a_3}$ extraídas de Farías (1995) combinadas con la ecuación de Manning $V = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$, donde V es la velocidad media del flujo, d del diámetro medio del sedimento de fondo y R el radio hidráulico y S la pendiente de fricción; a_0, a_1, a_2, a_3 son coeficientes de ajustes proporcionados por diferentes autores.

La Tabla 26 presenta los coeficientes utilizados, la velocidad calculada y el n de Manning despejado. Se utilizaron los valores de $R = 2,79 \text{ (m)}$, $S = 0,0004$ y $d = 0,017$.

Tabla 26.- Cálculo de n de Manning a partir de formulaciones potenciales.

	a0	a1	a2	a3	V (m/s)	n ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)
Manning - Strickler	21.10	-0.167	0.667	0.500	1.12	0.0352
Pavlovsky - Lacey	17.81	-0.133	0.736	0.515	0.85	0.0465
Sugio	7.90	0.000	0.540	0.270	1.66	0.0238
Chitale	7.34	0.000	0.646	0.293	1.44	0.0276
Maza-Cruickshank	495.85	0.340	0.637	0.456	14.73	0.0027
Brownlie	13.29	-0.029	0.529	0.389	1.15	0.0345
Peterson & Peterson	7.55	-0.017	0.437	0.276	1.41	0.0282
Karim & Kennedy	18.19	-0.103	0.603	0.497	0.83	0.0478
Camacho & Yen	97.93	0.216	0.636	0.401	5.57	0.0071
Fariás	4.78	0.026	0.499	0.213	1.44	0.0275

Se observa que los valores del n de Manning obtenido a partir de las formulaciones oscilan entre $0,0238$ y $0,0478 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ si tomamos los valores por encima de $0,02 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

7.1.3. Primera Corrida del Modelo – Sin Vertedero Lateral

Con el fin de observar cómo se propaga el hidrograma entero se realizó una corrida sin pérdidas en el sistema. Este caso podría ser el que se observaría si no hubiera desbordes en el tramo y toda el agua llegase a Misión La Paz.

En la Figura 165 se muestra el hidrograma para todo el periodo de estudio para la geometría del SRTM y en la Figura 166 para la geometría de ASTER.

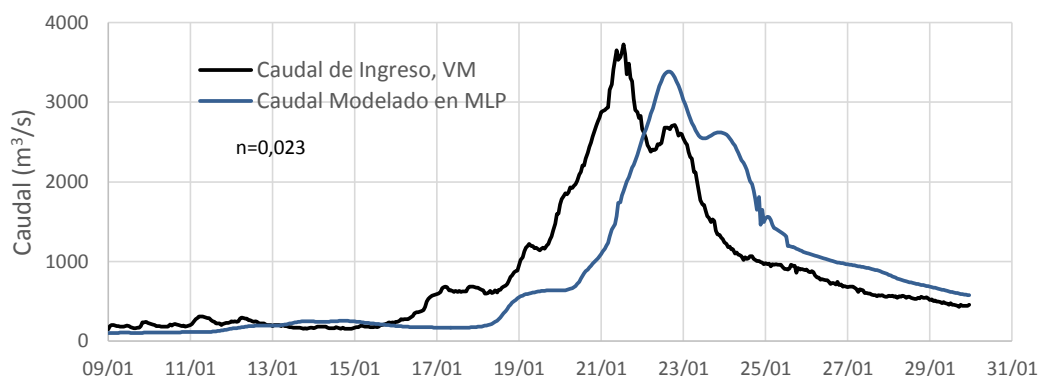


Figura 165.- Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación) Geometría SRTM.

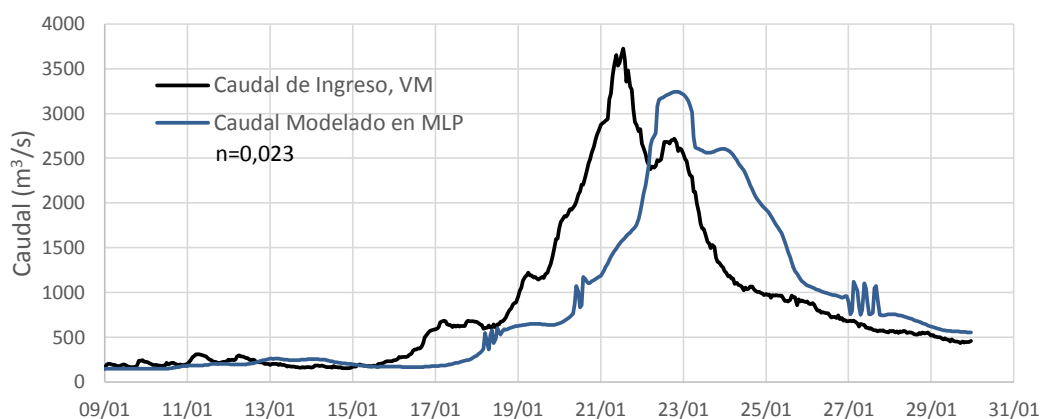


Figura 166.- Hidrogramas en VM (Dato de Entrada) y MLP (Resultado de la Modelación), Geometría ASTER.

La Figura 167 presenta los resultados obtenidos con ambas geometrías.

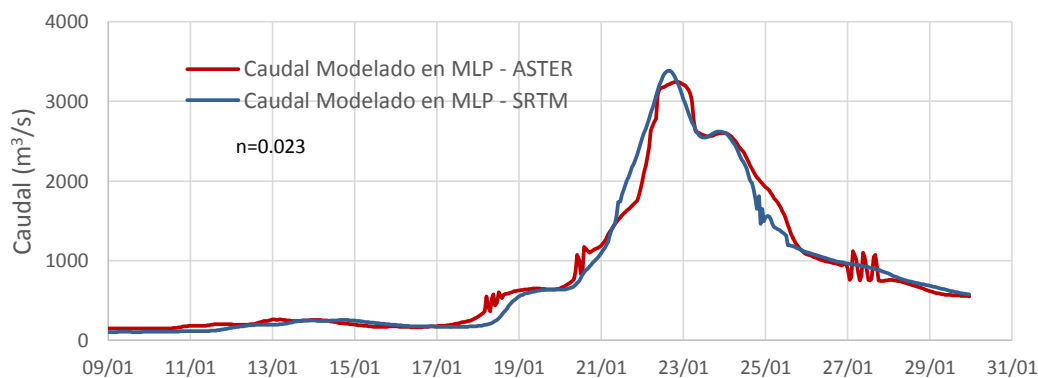


Figura 167.- Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER.

Se concluye que con ambas geometrías se consiguen hidrogramas muy similares, con la diferencia que la de ASTER produce mayor ruido. Es decir que el modelo no es sensible a

estas geometrías, aunque se prefiere trabajar con la geometría de SRTM que presenta menos discontinuidades.

7.1.4. Segunda Corrida del Modelo – Con Vertedero Lateral

A continuación, con el objetivo de ver qué sucede con el hidrograma al haber una pérdida de caudal consecuencia de los desbordes, se simuló con un vertedero lateral en la progresiva correspondiente al desborde El Chañaral (70260 m) (Figura 168). Este análisis se planteó con un solo vertedero lateral que simularía los cuatro desbordes, en trabajos futuros se pueden proponer estudios con múltiples vertederos. La cresta del vertedero lateral se tomó igual al punto más bajo de la margen derecha del río a la altura del Chañaral (cota 273 m). El ancho se fijó en 2000 m a partir de imágenes satelitales en que se observan los desbordes, se realizó también una corrida con un ancho de vertedero de 1700 m y no hubo cambios en los resultados.

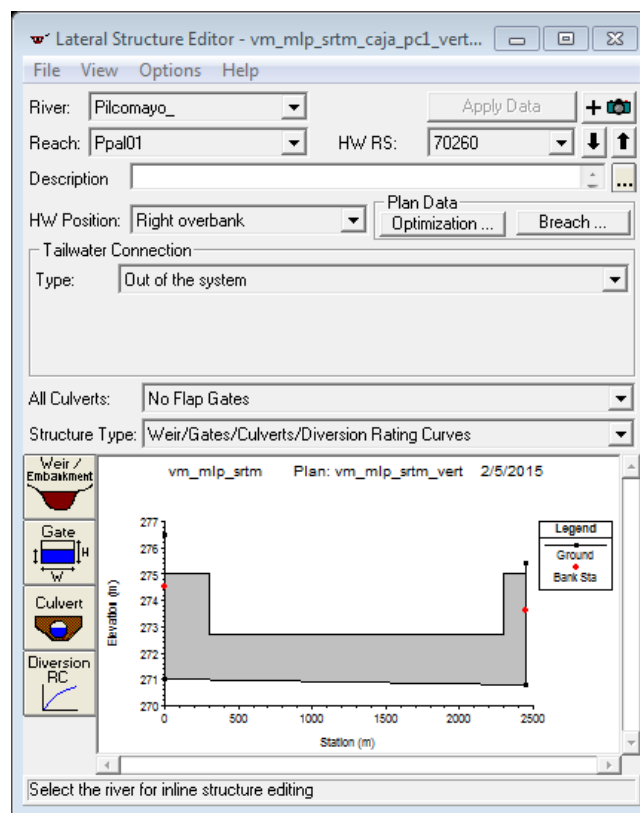


Figura 168.- Modelo Lateral impuesto a la modelación.

La Figura 169 junto a la Figura 170 justifican por qué se ha elegido la cota 273 m para la cresta del vertedero. Se observa que para esta cota la zona delimitada como El Chañaral se activa.

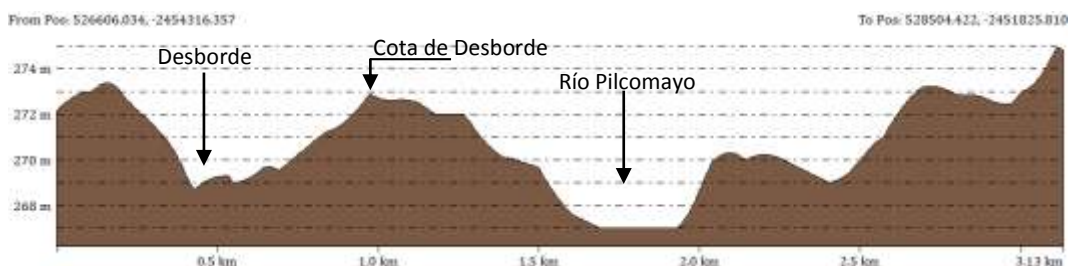


Figura 169.- Sección en progresiva de El Chañaral.

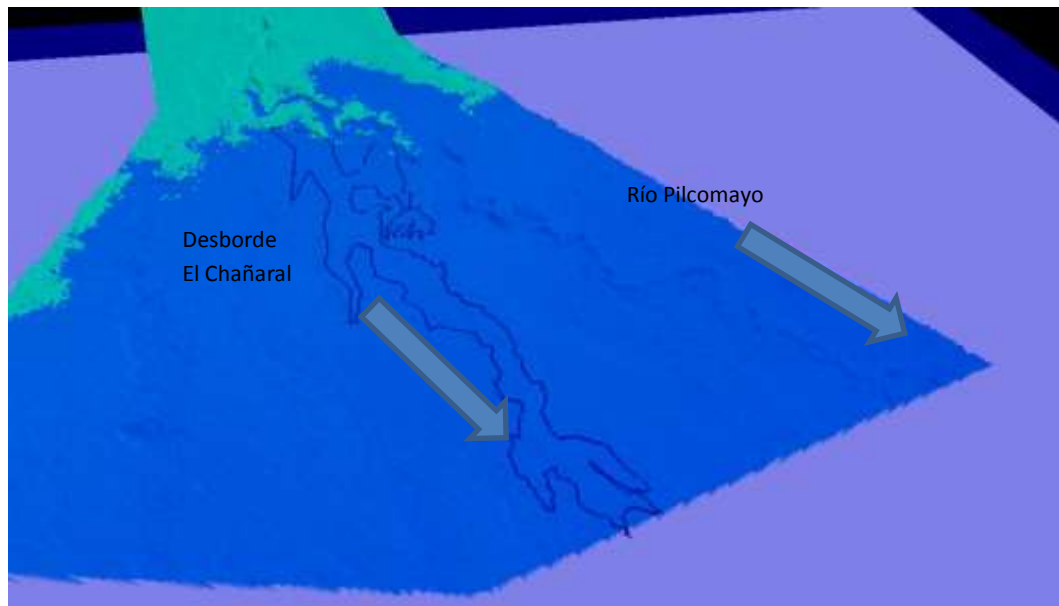


Figura 170.- Zona por debajo de los 273 m (en azul), se activa El Chañaral.

El hidrograma de Entrada en Villamontes es el mismo que para la corrida anterior (Figura 159).

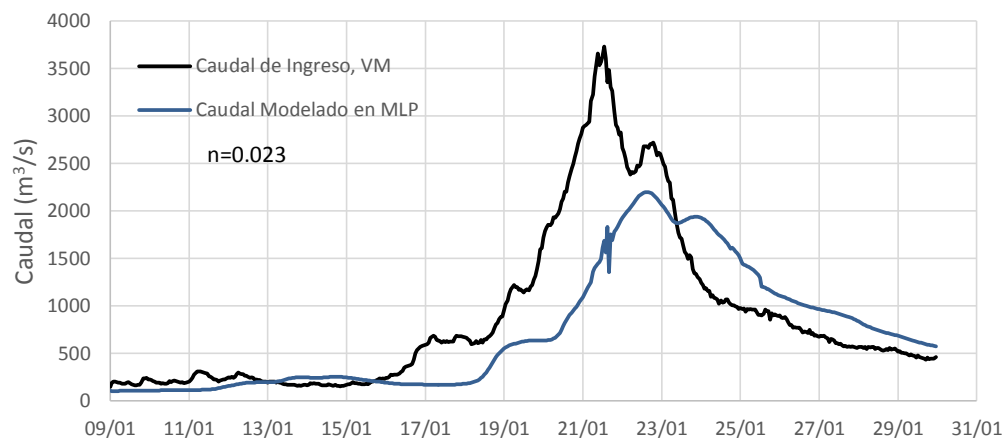


Figura 171.- Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT SRTM.

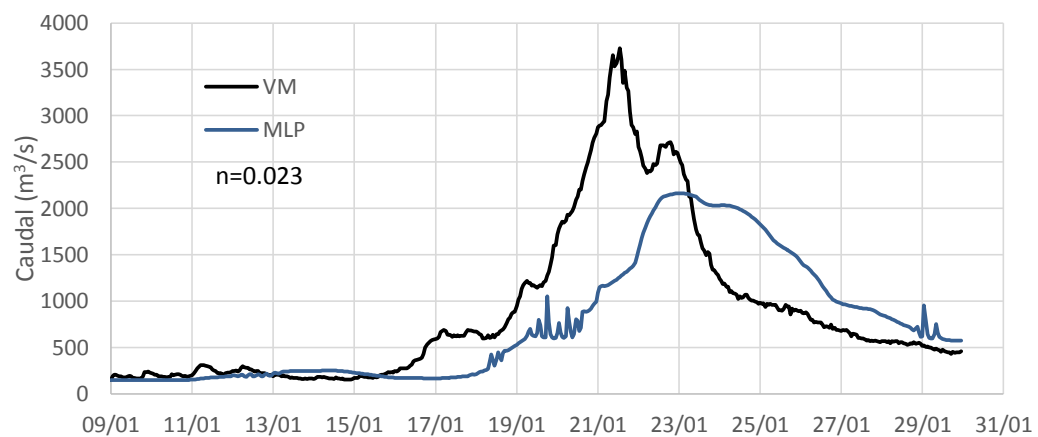


Figura 172.- Resultados de la modelación con vertedero lateral con MDT ASTER.

Se observó que para MLP el pico del hidrograma simulado con geometría SRTM (Figura 173) es de 2198,4 m³/s para el 22 de enero de 2013 a las 15 hs siendo el observado 2119,86 m³/s para el mismo día a las 23 hs, es decir el caudal pico simulado es un 3,7 % mayor y arriba 8 hs antes. No obstante, si uno toma como frente de crecida un caudal de 1700 m³/s, ambos arriban el 21 de enero a las 17 hs. Además el volumen de agua de todo el periodo es 1310 hm³ para el hidrograma simulado y 1294 hm³ para el observado, una diferencia del 1,2 %. Si se mide el volumen entre rama ascendente y descendente la diferencia es un poco mayor, de un 8 %, siendo 1149 hm³ el volumen para el hidrograma simulado y 1055 hm³ para el observado.

En el caso de la geometría ASTER (Figura 172) el pico simulado fue de 2162,42 m³/s el 23 de enero a las 1:00 hs y el observado, es decir 2 hs de diferencia con el arribo del pico observado y un 2 % por encima del caudal. Para esta geometría el volumen del hidrograma simulado que arriba a MLP es de 1376 hm³, un 6 % mayor al observado y si tomamos solo a partir de la rama ascendente del hidrograma, el volumen simulado durante la crecida es de 1198 hm³, un 12 % mayor al observado.

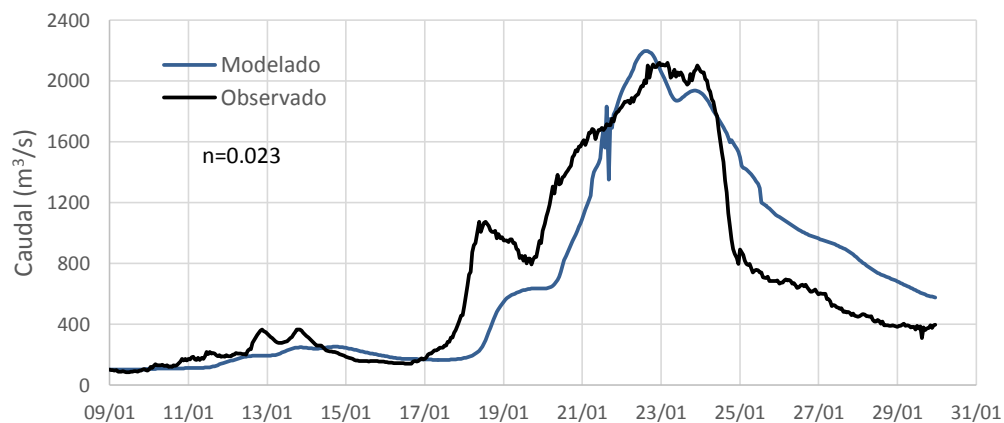


Figura 173.- Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT SRTM.

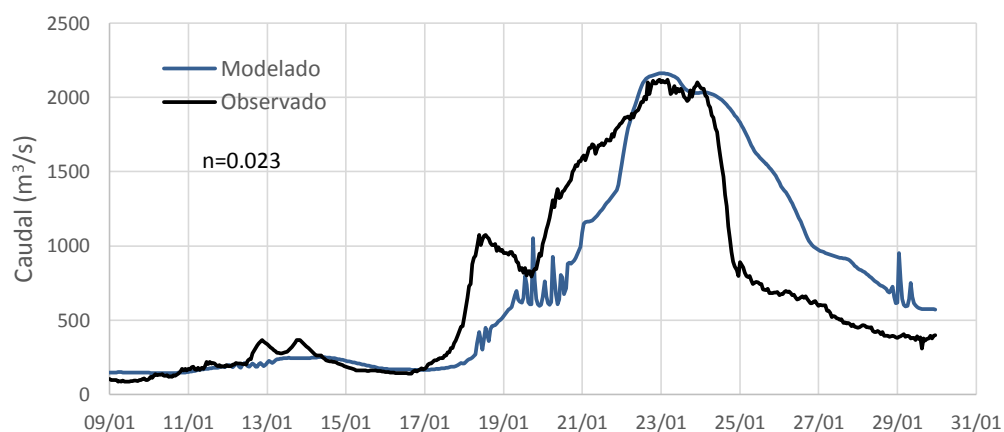


Figura 174.- Comparación de Hidrogramas que arriban a MLP, según modelo y según aforos, MDT ASTER.

Se observa a partir de la Figura 173 y de la Figura 174 que los hidrogramas tienen la misma forma que el aforado, pero el obtenido a partir de aforos arriba a la sección con mayor caudal en la rama ascendente y menor caudal en la descendente. Este problema se podría solucionar agregando más vertederos laterales a la altura de los otros desbordes.

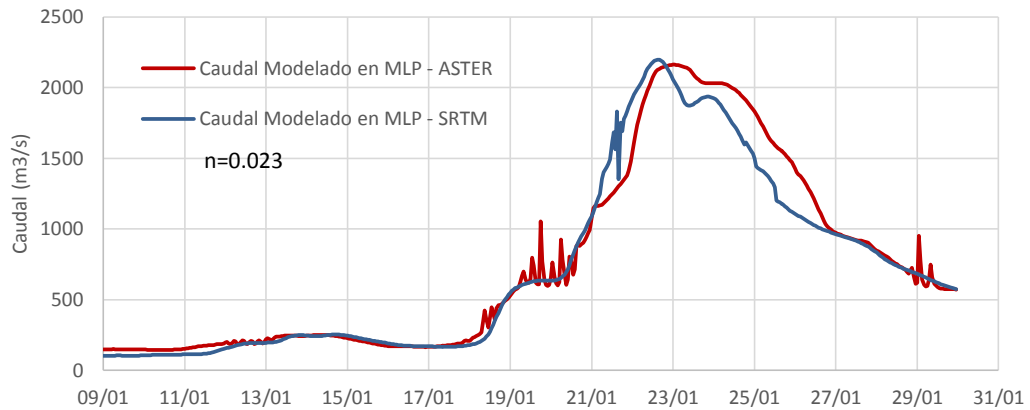


Figura 175.- Comparación de Resultados de la Modelación con Geometrías SRTM y ASTER.

Además, al comparar los resultados de las modelaciones con geometría ASTER y SRTM (Figura 175), se observa que la diferencia en sus resultados es inferior al 5%, es decir, no son sensibles a las topografías utilizadas. Se observa más ruido en el obtenido a partir de la topografía ASTER. Se buscó que el volumen debajo de la curva del hidrograma durante la crecida fuera lo más cercano para el hidrograma aforado y el modelado. El volumen desbordado según los hidrogramas medidos con geometría SRTM es de 299 hm³ y según el modelo de 278 hm³, una diferencia inferior al 8%. Con geometría ASTER el volumen desbordado simulado es de 252 hm³, un 15% inferior al observado.

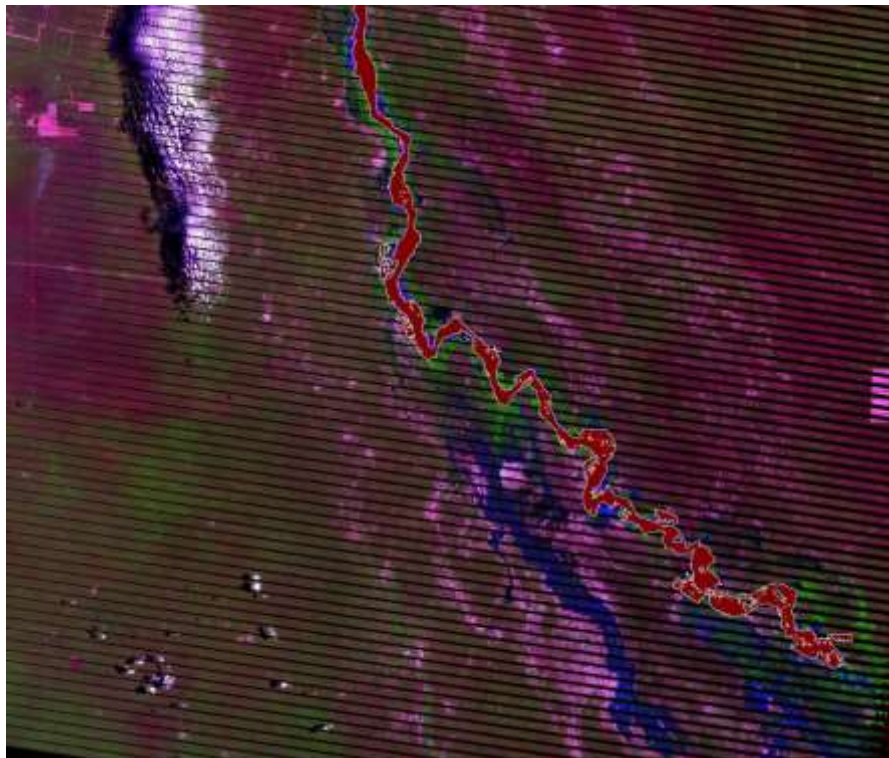


Figura 176.- Superposición Imagen Landsat 25/01/2013 y resultados HEC-RAS, en rojo.

La Figura 176 presenta la superposición de los resultados del modelo hidráulico georreferenciados (en rojo) sobre la imagen satelital que se dispone de la crecida. Hay

una buena coincidencia entre las superficies libres de la imagen y del modelo. Se puede ver también que el modelo muestra la activación de los desbordes El Chañaral y La Gracia.

Se concluye a partir de lo analizado, que el modelo realizado logra una buena representación en planta de los desbordes, así como estima el volumen que llega a Misión La Paz y el pico de la crecida.

7.2. Modelación Hidráulica Bidimensional

El modelo hidráulico bidimensional se realizó con el Software Delft-3D (Deltares, 2010) en la zona del desborde El Chañaral. Se realizó un modelo digital de terreno a partir de datos obtenidos de imágenes SRTM (USGS, 2014) que han sido mejorados incorporando modificaciones en la topografía como: la inclusión de terraplenes que en el momento del levantamiento no existían y la profundización del cauce donde escurre el agua y donde el SRTM no puede detectar la batimetría. Se optó por un modelo digital de terreno a partir de información radar debido que al momento de realizar esta modelación no se cuenta con información topobatimétrica medida en la zona de interés.

Se analizó el modelo digital de terreno para determinar las cotas de desbordes. Para determinar las condiciones de borde aguas abajo y así calibrar el modelo bidimensional se utilizaron: a) las manchas de desbordes obtenidas a partir de imágenes satelitales b) los datos de caudales correspondientes a imágenes satelitales de desborde incipiente y desborde activo, c) los hidrogramas de Villamontes.

7.2.1. Modelo digital del terreno

La Figura 177 presenta el modelo digital de terreno obtenido a partir del análisis de imágenes SRTM que comprende los desbordes La Garrapata y El Chañaral. En la imagen ha sido necesario añadir las defensas de Santa María y corregir la topografía en el cauce debido a que el SRTM no detecta la cota de fondo por debajo del agua (Figura 177). La resolución de la malla numérica es de 30 m x 30 m (Figura 178).

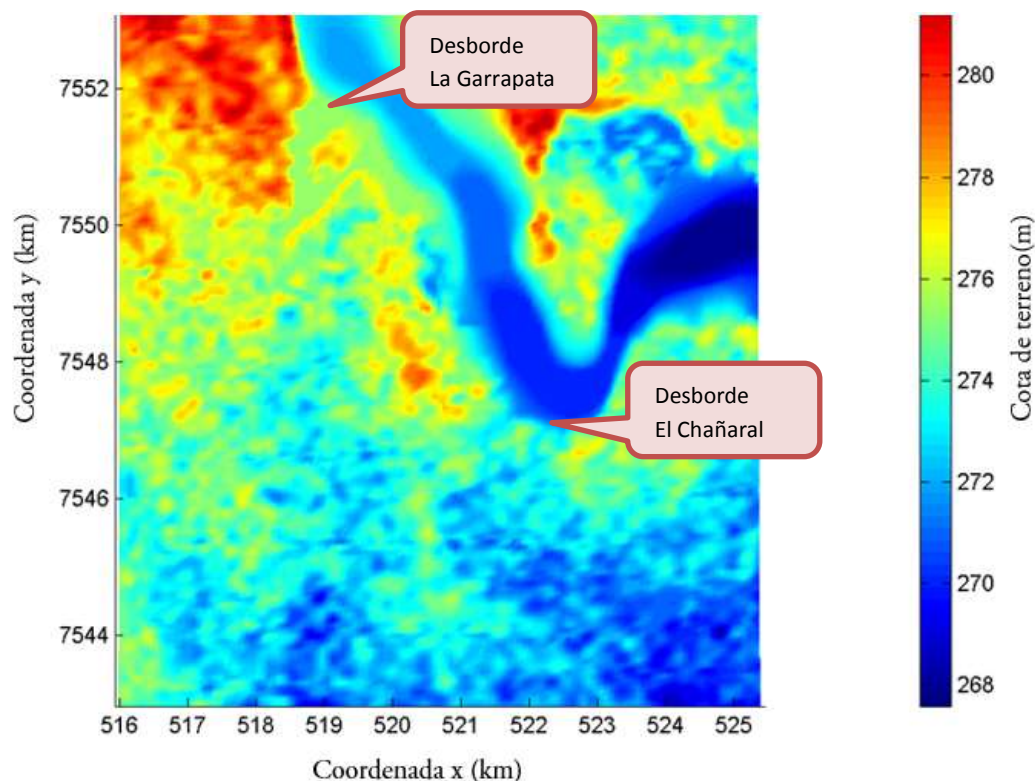


Figura 177.- Modelo digital de terreno de la zona de Estudio

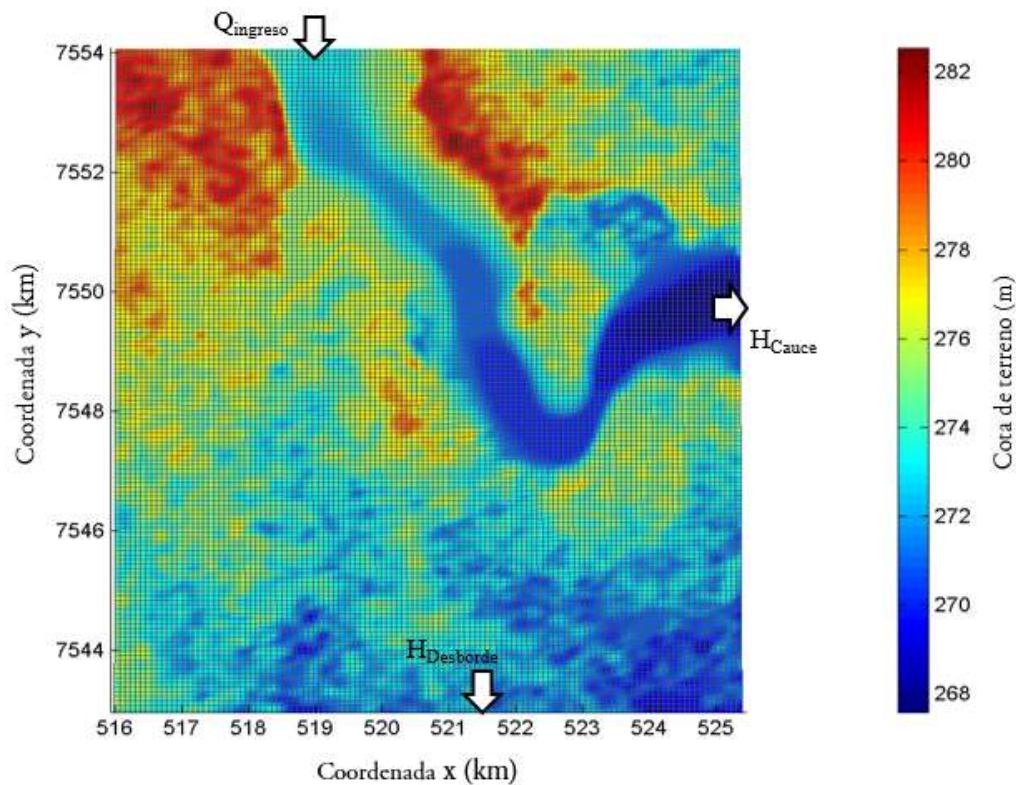


Figura 178.- Malla de cálculo con interpolación del MDT en zona de estudio y condiciones de borde.

7.2.2. Escenarios modelados y resultados

Con el modelo digital de terreno y la malla definidos, se procedió a realizar las corridas del modelo. Se ensayaron caudales de diferente magnitud, con el objetivo de ver que caudales activan los desbordes de La Garrapata y El Chañaral, así como para ver las velocidades del desborde a medida que aumenta el caudal evacuado. En esta tesis se presentan los resultados para caudales de 2500 m³/s (Figura 179), 3000 m³/s (Figura 180), 3500 m³/s (Figura 181), 4000 m³/s (Figura 182) y 5000 m³/s (Figura 183).

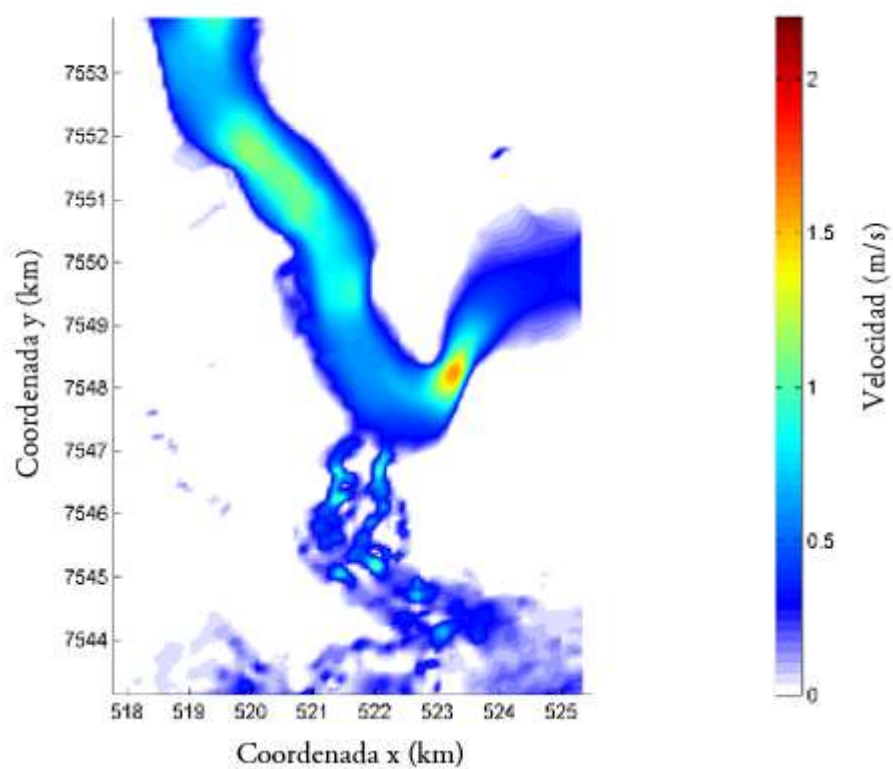


Figura 179.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

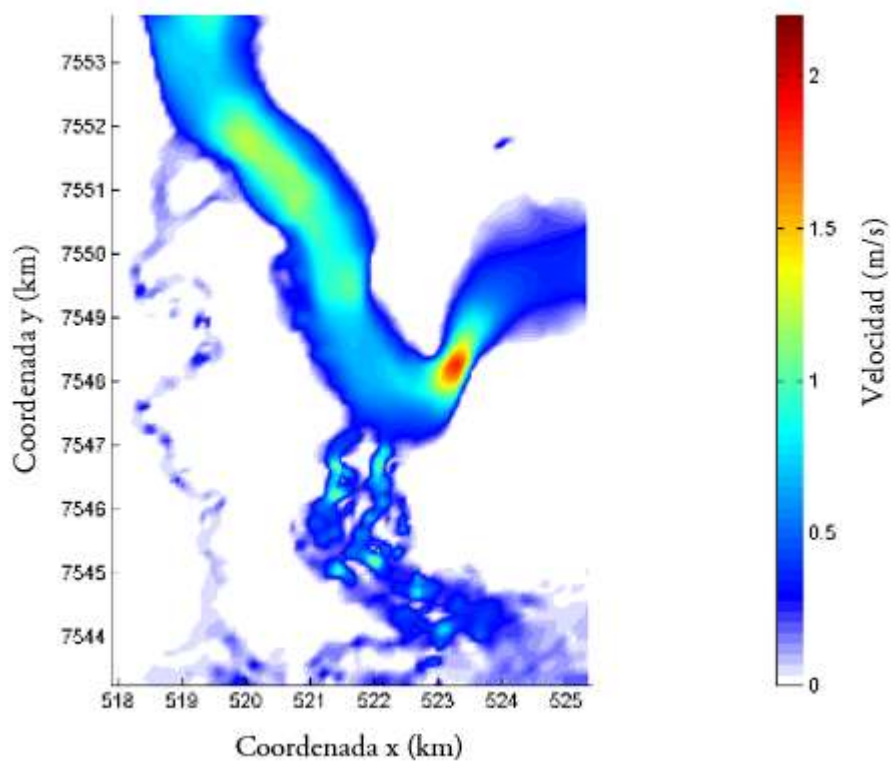


Figura 180.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3000 \text{ m}^3/\text{s}$.

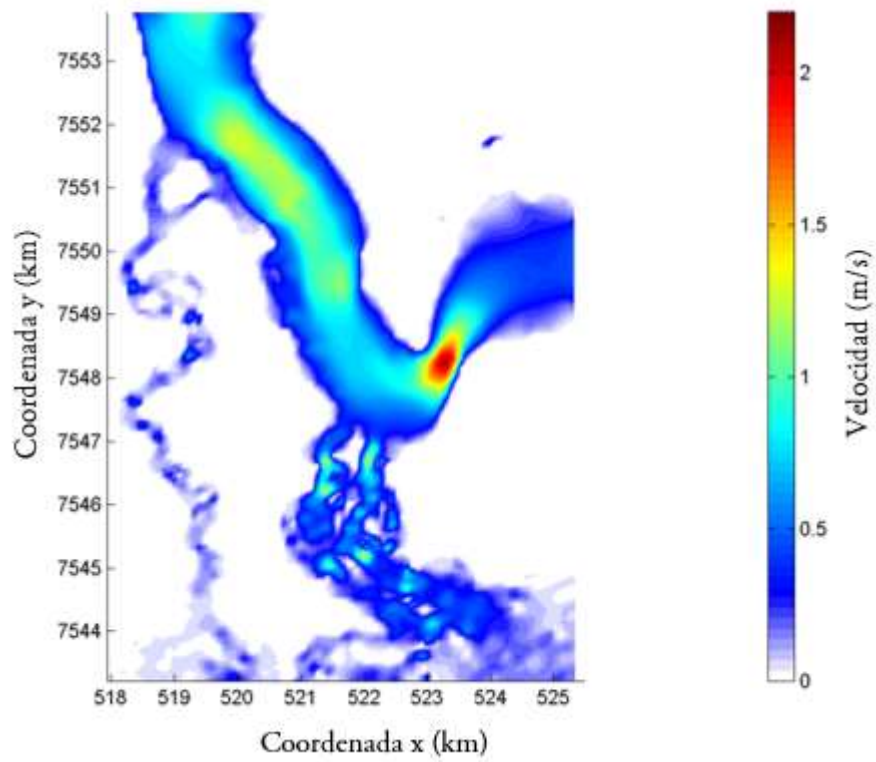


Figura 181.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=3500 \text{ m}^3/\text{s}$.

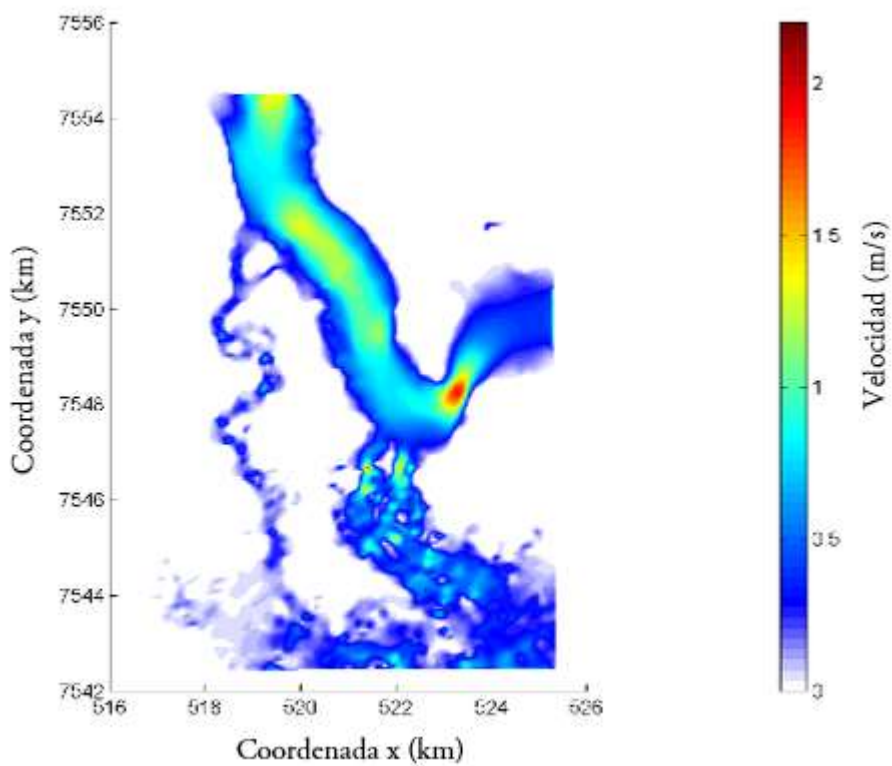


Figura 182.- Velocidad promediada en la vertical $Q=4000 \text{ m}^3/\text{s}$.

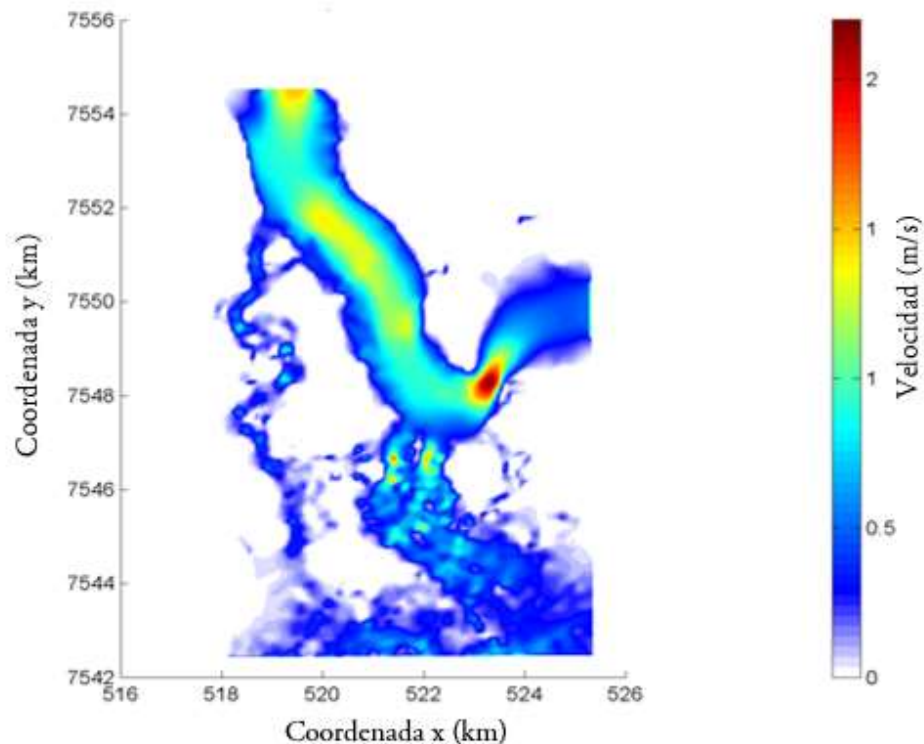


Figura 183.- Velocidad promediada en la vertical para $Q=5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se observa al comparar las figuras, que el desborde El Chañaral se activa antes que el desborde La Garrapata. Para un caudal de ingreso de $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ El Chañaral se encuentra activo con velocidades de $0,50 \text{ m/s}$, mientras que La Garrapata se activa incipientemente para caudales de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa que El Chañaral desborda en dos brazos que luego se unen, cuyas velocidades de desborde van aumentando a medida aumentan los caudales, desde una velocidad de aproximadamente $0,50 \text{ m/s}$ para el primer caso simulado y hasta el orden de 1 m/s para los $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Para el desborde La Garrapata, se observan velocidades del orden de $0,10 \text{ m/s}$ para los $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ llegando hasta $0,60 \text{ m/s}$ para los $5000 \text{ m}^3/\text{s}$.

7.2.3. Imágenes satelitales

Se utilizaron las imágenes Landsat recolectadas con desbordes activos visibles junto con los datos hidrométricos correspondientes a las imágenes para calibrar y verificar el modelo hidráulico bidimensional.

La Tabla 27 presenta la información referida a las imágenes utilizadas. Se utilizaron las imágenes con caudales próximos a la activación de los desbordes El Chañaral y La Garrapata, a partir de lo analizado en el capítulo 6 .

Tabla 27.- Caudales pico del hidrograma de crecida y Caudales en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por desbordes calculados a partir de las imágenes (Testa Tacchino 2015).

Imagen	Fecha	Fecha del Pico VM	Q_p VM	Fecha del Pico MLP	Q_p MLP	Q VM	Q MLP	ΔT pico	ΔT img y pico
yyyyddd	dd/mm/yyyy	dd/mm/yyyy	m ³ /s		m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	días	días
2009062	03/03/2009	05/03/2009	2680	07/03/2009	2300	1830	1111	2	4
2013025	25/01/2013	20/01/2013	3860	23/01/2013	2446	964	573	3	2

7.2.4. Cálculo de caudales de desborde

La Figura 184 presenta las secciones para las cuales se han calculado los caudales en el modelo. Se estudiaron cuatro secciones que corresponden a: el caudal de ingreso (Q_{ingreso}), que se toma coincidente con la condición de borde aguas arriba, Q_G que representa el caudal del desborde La Garrapata, Q_C que es caudal desbordado por El Chañaral y Q_{AAb} que es el caudal en el cauce del río aguas abajo de los desbordes. La Figura 185 presenta la distribución de caudales, a partir del caudal de ingreso se obtiene el que desborda por El Chañaral, por la Garrapata y cuánto continúa aguas abajo por el cauce del río, estos resultados se encuentran tabulados en la Tabla 28.

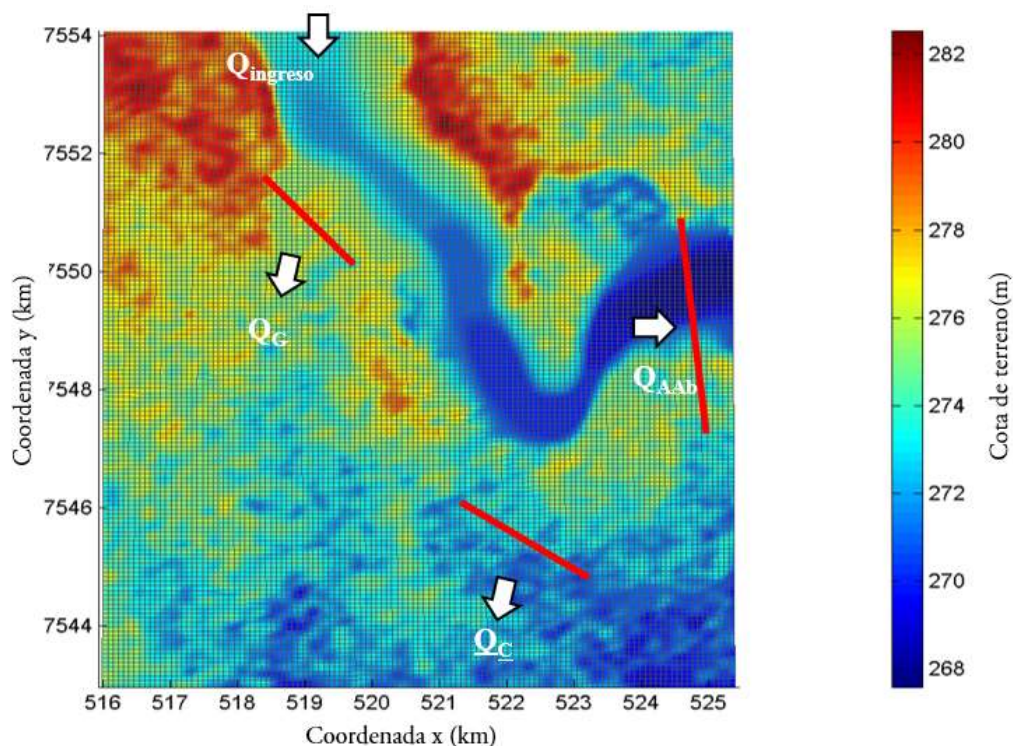


Figura 184.- Secciones de cálculo de caudales.

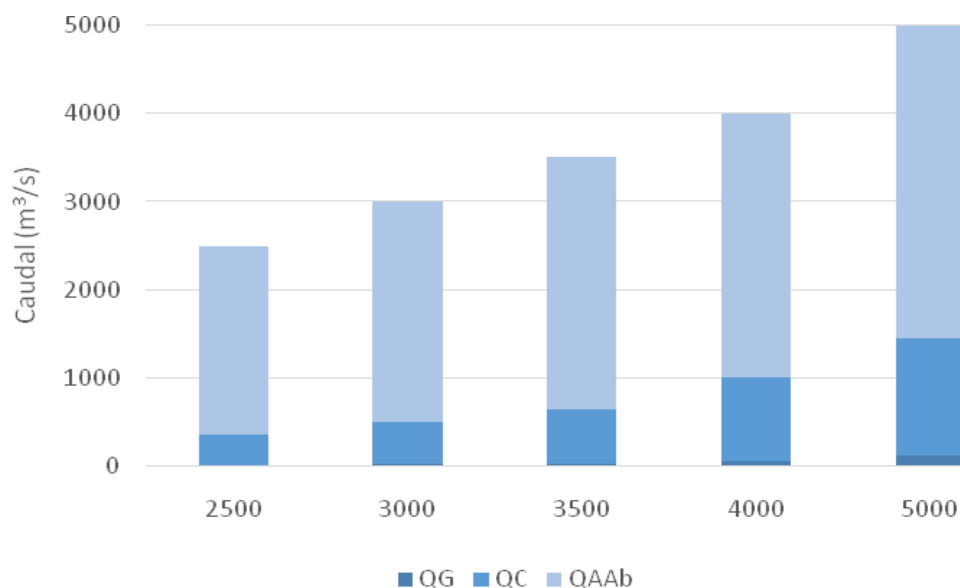


Figura 185.- Distribución de caudales según caudal de ingreso.

Tabla 28.- Caudales Calculados para los desbordes y aguas abajo, en el cauce (m³/s).

	Caudales (m³/s)				
QINGRESO	2500	3000	3500	4000	5000
QGARRAPATA	4	12	23	41	118
QCHAÑARAL	352	477	609	964	1332
QAGUAS ABAJO	2144	2511	2868	2995	3550

Tabla 29.- Incidencia porcentual de los desbordes.

	Porcentajes				
QINGRESO	2500 m³/s	3000 m³/s	3500 m³/s	4000 m³/s	5000 m³/s
QGARRAPATA	0,2%	0,4%	0,7%	1,0%	2,4%
QCHAÑARAL	14,1%	15,9%	17,4%	24,1%	26,6%
QAGUAS ABAJO	85,8%	83,7%	81,9%	74,9%	71,0%

La Figura 186 presenta los caudales aguas arriba y aguas abajo de los desbordes La Garrapata y El Chañaral. Para comprender la figura hay que tener en cuenta que los caudales aforados se miden en las estaciones de Villamontes y Misión la Paz, mientras que los calculados se obtienen en las secciones delimitadas anteriormente. Es necesario remarcar que los caudales medidos en Villamontes, al arribar a la sección modelada aguas arriba de MLP disminuyen como consecuencia del tránsito en el cauce y que en el tramo comprendido entre aguas abajo de El Chañaral y Misión la Paz ocurren desbordes que se activan para caudales superiores a los 3.000 m³/s, efectos que no están presentes en el tramo modelado. Es decir, la comparación entre los caudales aforados y los modelados tiene ciertas limitaciones, pero al observar la Figura 187 se observa una buena relación entre la mancha del desborde obtenida a partir de la imagen satelital y la mancha modelada.

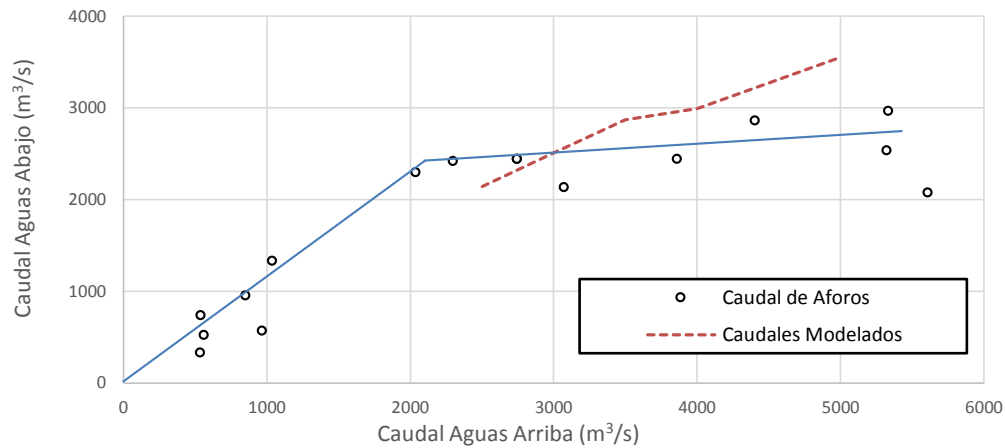


Figura 186.- Caudales aguas arriba vs aguas abajo de los desbordes en estudio.

A partir de imágenes satelitales durante crecidas en combinación de bandas de falso color 5-4-3 para Landsat 5 y 7 y combinación 6-5-4 para Landsat 8 y su correspondencia con hidrogramas y caudal pico del evento presente en la imagen (Testa Tacchino, 2015) se extrajeron las imágenes correspondientes a caudales pico próximos a los modelados para calibrar el modelo bidimensional.

La Figura 187 presenta los resultados modelados para el caudal de 2500 m³/s sobre la imagen Landsat del día 3 de marzo de 2009 y la Figura 188 para el caudal de 3500 m³/s sobre la imagen del 25 de enero de 2013. Sobre estas imágenes se han delimitado también los desbordes observados en las imágenes de satélite: en azul el desborde El Chañaral y en rojo La Garrapata.

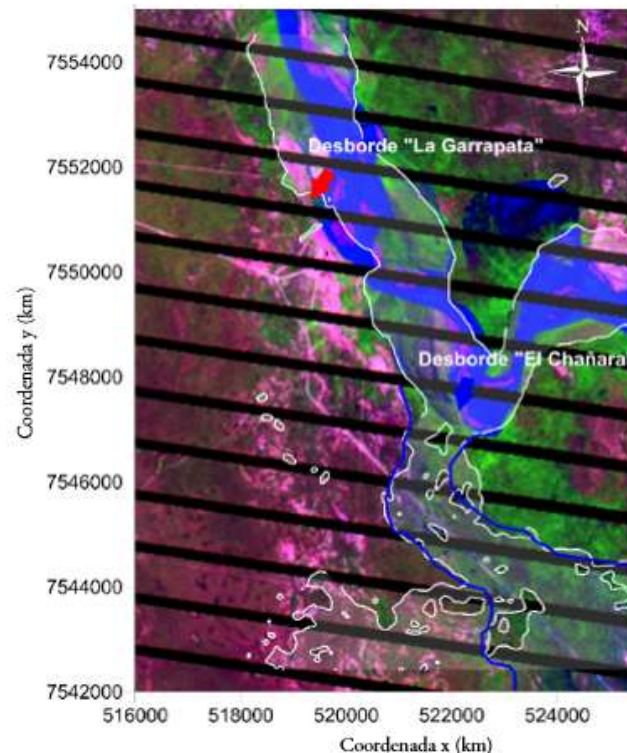


Figura 187. Superposición de desborde modelado para un caudal de 2500 m³/s (Img. Landsat 3/3/2009). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral.

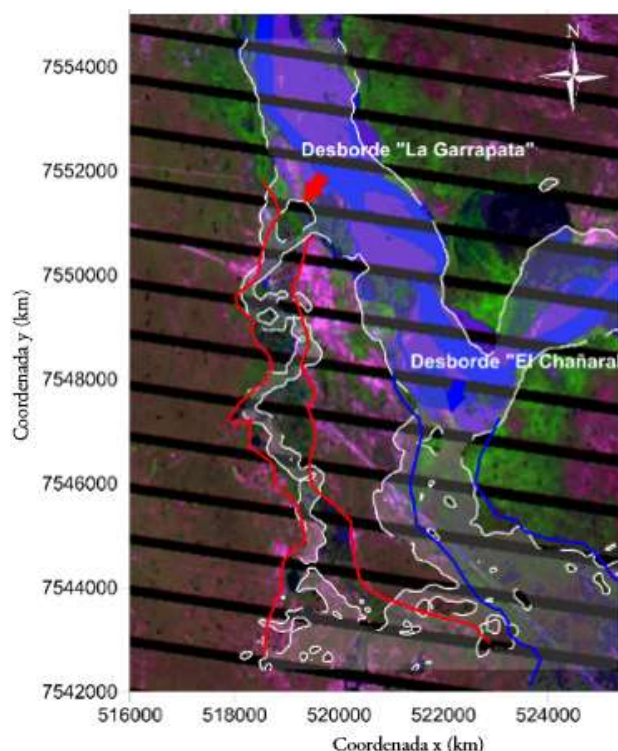


Figura 188. Superposición de desborde modelado para un caudal de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ (Img. Landsat 25/1/2013). Se muestra en blanco el desborde delimitado a partir de la imagen satelital y en azul y rojo el obtenido a partir de la modelación numérica para el desborde El Chañaral y La Garrapata, respectivamente.

7.2.5. Limitaciones de la modelación

La modelación al ser a lecho fijo y sin transporte de sedimentos presenta una limitación al compararla con las diversas complejidades del tramo en estudio, ya presentadas con anterioridad, como la elevada tasa de transporte de sedimentos y material vegetado, así como grandes variaciones de la cota de lecho: en Misión la Paz, 51,2 km aguas abajo de El Chañaral, se han registrado movimientos del fondo de 7 m en profundidad en aforos antes y después del paso de la crecida.

Otra limitación es la baja resolución del modelo digital del terreno obtenido a partir de SRTM. Lo óptimo sería contar con una topobatimetría de la región de desbordes que permita trabajar con mayor definición, pero lamentablemente no se ha podido obtener durante el desarrollo de esta tesis.

7.2.6. Consideraciones finales

A partir del análisis de imágenes satelitales, hidrogramas y análisis de curvas de excedencia, se ha determinado que el desborde La Garrapata se encuentra inactivo para $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ y se activa incipientemente a los $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ para una cota de 274,1 msnm. El desborde El Chañaral se encuentra inactivo para los $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ y se activa para los $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ a la cota 273,85 msnm. Es importante recordar que los caudales que ingresan a la zona de estudio son inferiores a los obtenidos por las lecturas de escalas y relaciones altura-caudal en Villamontes, consecuencia de los desbordes aguas arriba (La Puerta) y el tránsito de la crecida, que reduce el pico aguas abajo.

Se ha verificado una buena correspondencia entre el caso modelado y el observado a través de imágenes satelitales e hidrogramas, se presenta una muy buena

correspondencia entre las manchas obtenidas a partir de la delimitación de los desbordes visibles en las imágenes satelitales y las manchas obtenidas como resultados de la modelación numérica, tanto para El Chañaral como para La Garrapata.

8. Metodología para el estudio de crecidas incluyendo el monitoreo del lecho en las secciones de aforo.

Como se ha visto en los capítulos precedentes, al ir abordando la temática desbordes se fueron presentado nuevos desafíos que fueron necesarios sortear para poder avanzar en el estudio.

Con toda esta información se ha confeccionado una metodología para el estudio de crecidas en el Río Pilcomayo.

- 1.- Recolección de lecturas de Escalas
- 2.- Aplicación de la curva H-Q de Villamontes y verificación con los aforos que se realice durante la crecida. Obtención de H-Q de Misión La Paz a partir de los aforos y contraste con H-Q histórica y de crecidas anteriores. Determinar si es necesario formulaciones diferentes para rama ascendente y descendente del hidrograma de crecida.
- 3.- Análisis de lectura de escala, con el fin de determinar el tiempo de arribo del pico y frente de crecida así como la duración del pico y de la crecida.
- 4.- Recolección de las Imágenes Satelitales para el periodo de crecidas, buscando aquellas con poca cobertura de nubes. Posterior análisis para localizar manchas por desbordes. Comparación con imágenes anteriores para detectar movimientos abruptos de meandros.
- 5.- Presentación de datos en una tabla resumen y comparación de los datos obtenidos con los de crecidas anteriores, para verificar que se cumplan los patrones ya establecidos, relación longitud-área de desborde, velocidad de avance, tiempo de permanencia, así como tiempo por encima de los $2700 \text{ m}^3/\text{s}$ en VM, es decir con desbordes.
- 6.- Aplicación de los modelos numéricos desarrollados y comparación con modelaciones de otras crecidas.
- 7.- Con los Aforos de Misión la Paz, analizar los movimientos del lecho y comparar con casos anteriores y formulaciones generales.

8.1. Análisis de la Crecida del año 2013

Se presenta a continuación la metodología aplicada a la crecida del año 2013, año hidrológico 2012. Esta crecida ya fue analizada en Testa Tacchino (2015).

8.1.1. Niveles de agua

Se poseen las lecturas de niveles de escala horarias para VM y MLP, las que se presentan en la Figura 189. Se observa que hay algunas discontinuidades que serán rellenadas por el método lineal.

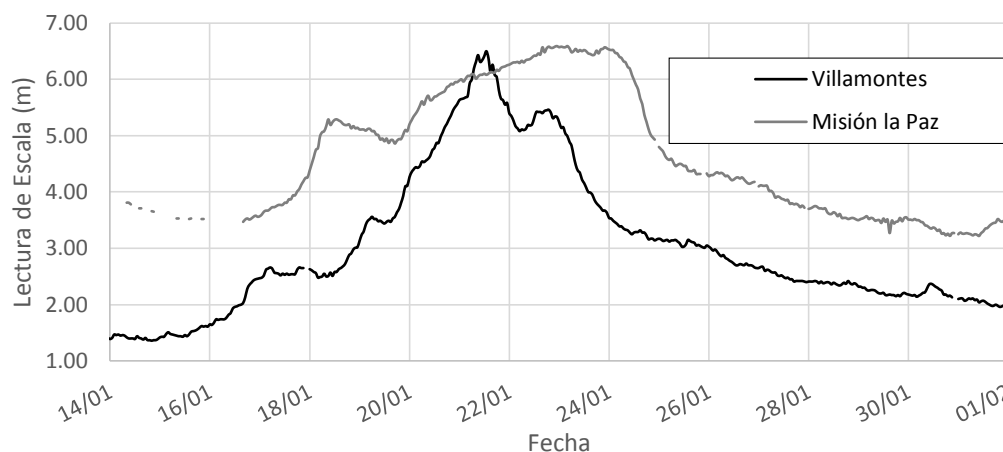


Figura 189.- Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.

8.1.2. Obtención de Hidrogramas

Se obtienen las curvas altura-caudal. Para Villamontes se aplica la formulación presentada en el inciso 3.1. Para Misión La Paz se obtiene la h-q a partir de los aforos con diferentes formulaciones para la rama ascendente y descendente. Los resultados se presentan en la Figura 190. El periodo de retorno calculado a partir de la ecuación propuesta para MLP en el Capítulo 4 es de 2,50 años.

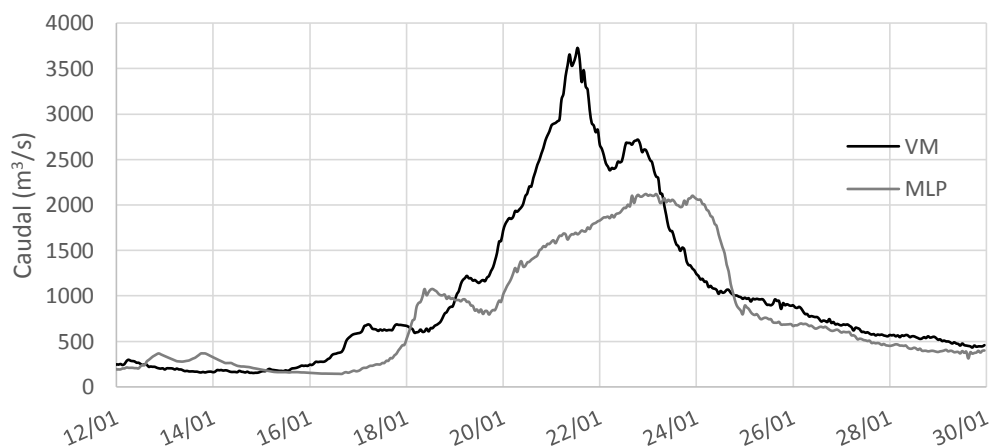


Figura 190.- Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz.

8.1.3. Análisis de niveles de agua (Lecturas de Escala hidrométrica)

Estudiando las lecturas de escalas proporcionadas de manera horaria por el sensor Kalesto, se ha podido estimar el tiempo de traslado de la crecida. La velocidad con que viaja, no es constante sino que depende del caudal y el tirante en cada momento. Así, por ejemplo, se han calculado velocidades de tránsito para el pico mayor de la crecida, un pico menor y los puntos de inflexión en Rama descendente y ascendente del hidrograma, encontrándose valores en un rango que oscila entre 33 y 37 hs para el pico mayor y hasta 41 hs para que viaje el punto de inflexión de la rama descendente. Estos valores se presentan en la Tabla 30.

Tabla 30.- Tiempo de tránsito y propagación de la Crecida a partir de lecturas de escala en VM y MLP

	Hora y Fecha del Pico		⌚ Tiempo
	VM	MLP	Horas
(1) Pico	02/01/2013 11:00	04/01/2013 04:00	41.0
(2) Pico mayor	21/01/2013 13:00	22/01/2013 22:00	33.0
(3) Inflexión R.Desc.	30/01/2013 10:00	31/01/2013 23:00	37.0
(4) Rama Asc.	17/01/2013 05:00	18/01/2013 09:00	28.0

También se calculó el tiempo de duración de la base del hidrograma, obteniéndose que duró 27 días en Villamontes y 17 días en Misión La Paz. Respecto a la duración del pico, se estableció de 10 hs en Villamontes y de 38 hs en Misión La Paz. Estos valores se presentan en la Tabla 31 y, en la Figura 191 se presenta un esquema de los productos utilizados para esta descripción.

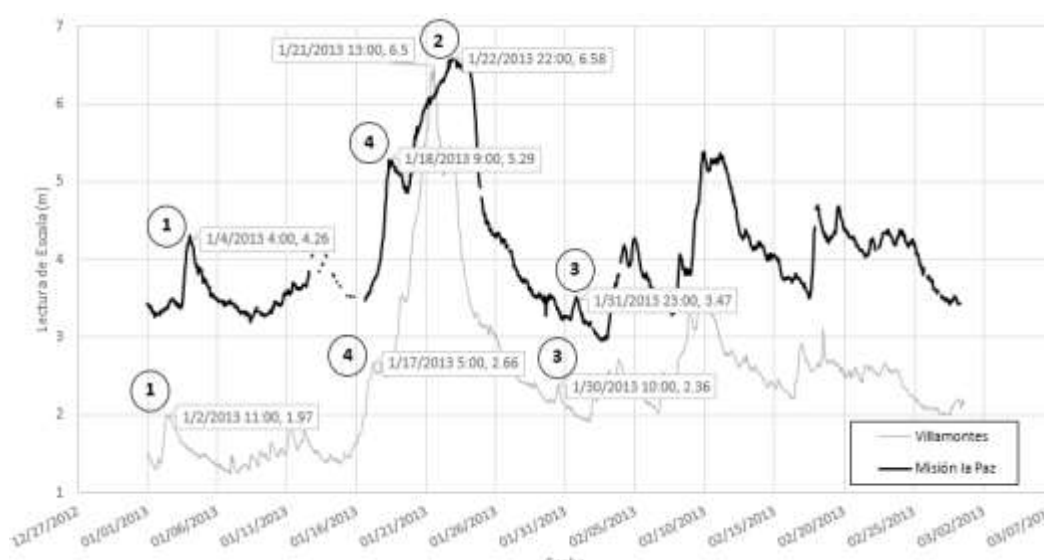


Figura 191.- Esquema de puntos para el cálculo de los tiempos de tránsito y duración de la crecida y el pico.

Tabla 31.- Duración base del hidrograma de crecida y duración del Pico

	Duración Base del Hidrograma de la Crecida		Δ Tiempo
	Inicio	Fin	Días
Villamontes	14/01/2013 16:59	01/02/2013 16:59	18
Misión La Paz	16/01/2013 16:59	02/02/2013 19:59	17,13

	Duración del pico de la Crecida		Δ Tiempo
	Inicio	Fin	Horas
Villamontes	21/01/2013 06:59	21/01/2013 16:59	10
Misión La Paz	22/01/2013 14:59	24/01/2013 04:59	38

8.1.4. Análisis de Imágenes Satelitales

Siguiendo el procedimiento detallado en el capítulo 6 se obtuvo la Figura 192. Con la imagen georreferenciada y herramientas de análisis de imágenes se identifican y delimitan los desbordes.

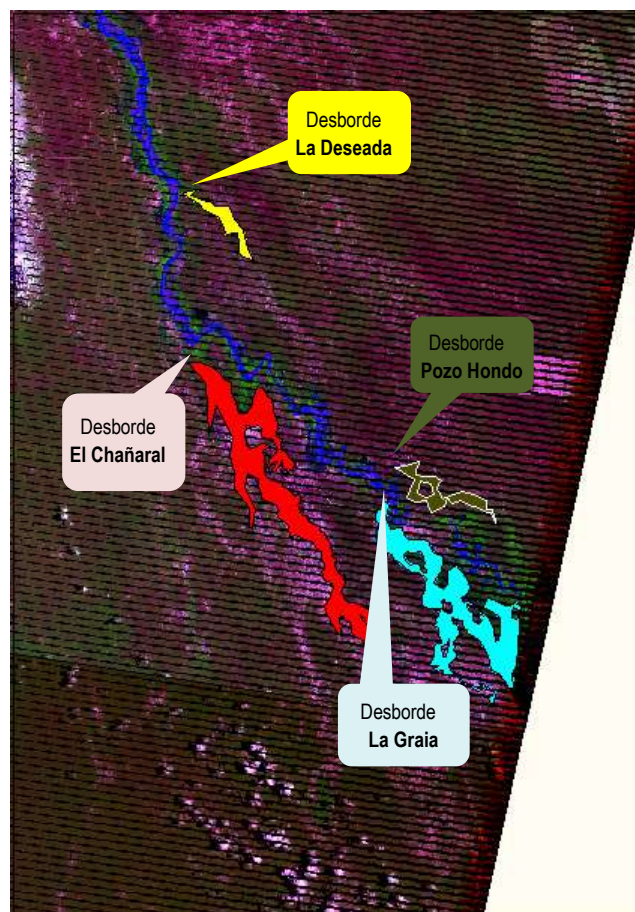


Figura 192.- Imagen Landsat 2013025 (25/01/2013).

8.1.5. Resultado del Análisis de la crecida y comparación con las de años anteriores

A partir de los datos recolectados, en los análisis anteriores se obtienen las áreas de desborde, las longitudes afectadas, el volumen desbordado y velocidad de avance del desborde. Los resultados para esta crecida se presentan en la Tabla 32. Se comparan estos

valores con los de años anteriores como ya se realizó en el capítulo 6. Para este año la diferencia de volúmenes que pasa por VM y luego por Misión La Paz es de 285 hm³ y el periodo de retorno del evento, obtenido a partir de 4.1 es de 2,50 años

Tabla 32.- Caudal pico del hidrograma de crecida y Caudal en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por los desbordes.

Imagen	Fecha	Fecha del Pico VM	Qp VM m ³ /s	Fecha del Pico MLP	Qp MLP m ³ /s	Q VM m ³ /s	Q MLP m ³ /s	ΔT pico días	ΔT marea días	Desbordes hacia Argentina		Desbordes hacia Paraguay			
										El Chañaral		La Gracia		Pozo Hondo	
										Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²
2013025	25/01/2013	18/01/2013	3880	23/01/2013	2848	964	573	-5	-2	42.38	115.00	28.27	111.72	14.21	20.09
														12.03	13.82

Los valores obtenidos se grafican en conjunto con los obtenidos en años anteriores. Las gráficas principales son las que vinculan el tiempo de la imagen con la distancia recorrida desde la activación del desborde (Figura 193) y las longitudes con las áreas inundadas (Figura 194), ya que han mostrado tener una buena relación y otra que se pueda proponer que despierte el interés.

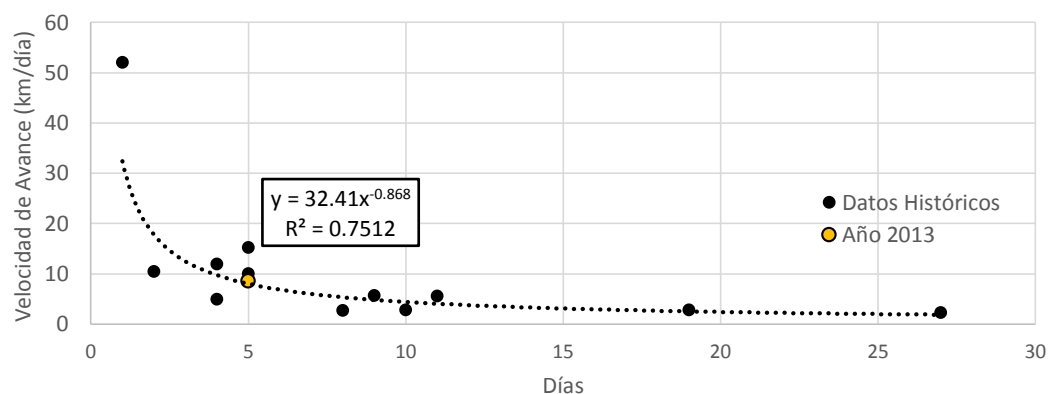


Figura 193.- Relación Velocidad de Avance vs. Días transcurridos desde activación del desborde El Chañaral.

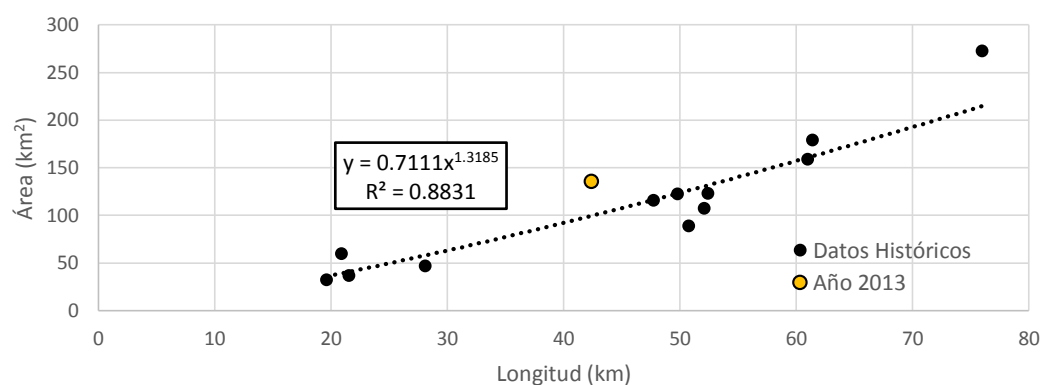


Figura 194.- Relación Área Inundada vs Longitud del desborde El Chañaral.

8.1.6. Comparación con desbordes anteriores, mediante GIS.

Se representaron en la Figura 195 todas las áreas inundadas por desbordes registradas por imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8. Se puede observar que las manchas son coincidentes para las diferentes crecidas. No obstante, se observaron 3 casos particulares. En el año 2008, una crecida con 17 años de periodo de retorno con 273 km² inundados, en la que el desborde el Chañaral inundó además del trayecto usual una porción al oeste (en amarillo). En el año 2013, representado en blanco en la figura, se observa que en la zona del Chañaral el Río Pilcomayo también desborda por margen derecha en una zona en la que no se tenía registro previo en imágenes conocido como “Bajada Grande” localizado una curva aguas abajo de El Chañaral. En el mismo año 2013 se observa que al Norte de La Puerta, en margen izquierda, a los 22° 00' de Latitud Sur y 62° 47' de Longitud Oeste, está activo un desborde que solo ha sido registrado en imágenes satelitales en el 2008. Es importante ver el desarrollo y posible recurrencia de estos nuevos desbordes y áreas inundadas.

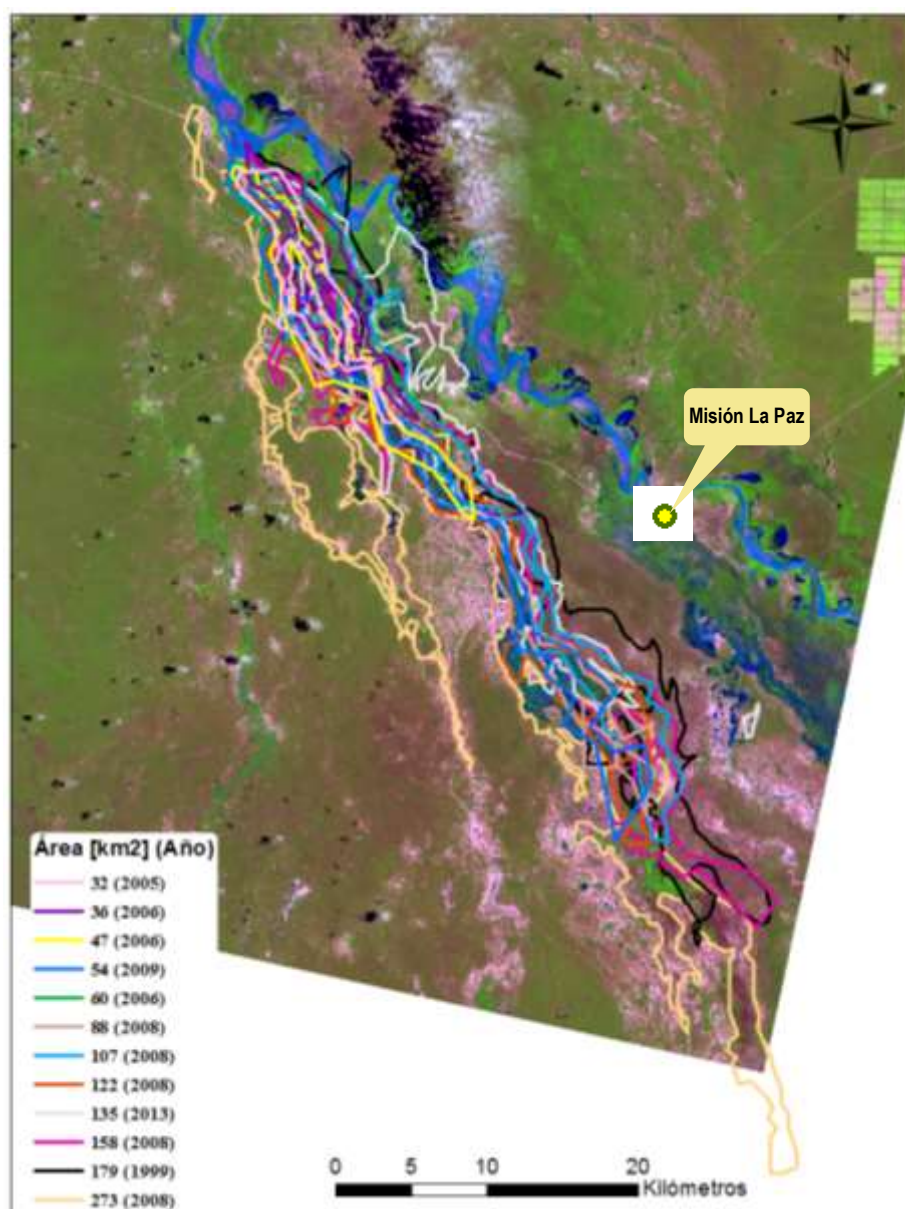


Figura 195.- Contornos de áreas inundadas por el desborde El Chañaral en diferentes eventos según extensión [km²]

8.1.7. Aplicación de los modelos numéricos

La aplicación de los modelos numéricos permite corroborar los valores obtenidos de volúmenes desbordados y además una primera aproximación al hidrograma de desbordes. Ya se presentó la metodología en el capítulo 7. La Figura 196 presenta un resultado de la modelación hidrodinámica y el caudal observado que arriba a Misión La Paz.

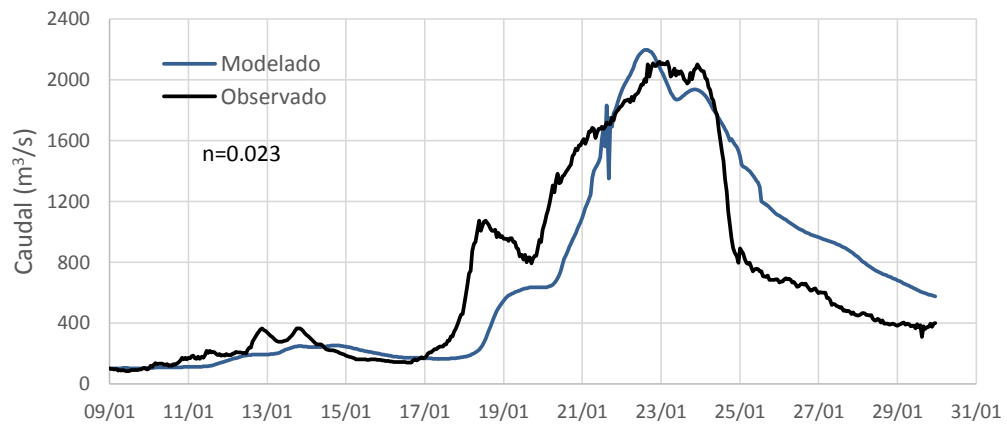


Figura 196.- Caudales que arriban a MLP, observado y modelado.

La Figura 197 presenta el hidrograma que representa la suma de los cuatro desbordes principales del tramo.

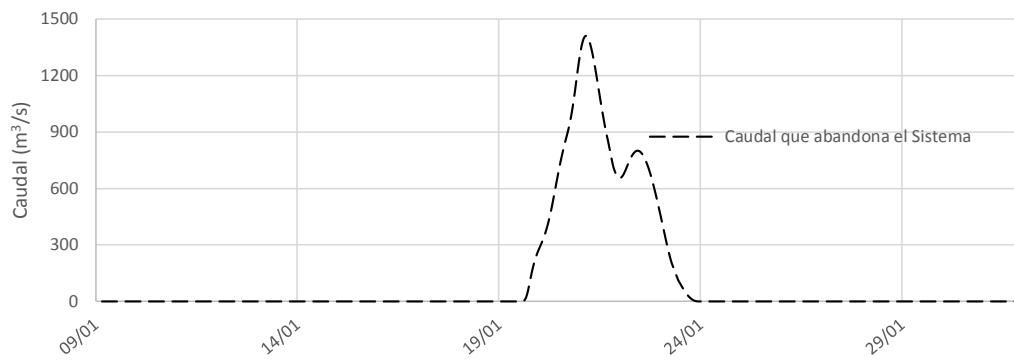


Figura 197.- Hidrograma modelado de los desbordes, efecto del vertedero lateral.

8.1.8. Movimiento del Lecho en las estaciones de Villamontes y Misión La Paz

En el Capítulo 3.2 se presentó en detalle el análisis del movimiento de fondo en MLP. Aquí se presenta nuevamente en la Figura 198 entre el 10 y el 30 de enero de 2013. Se observa en la Figura 189 que los niveles para este periodo van desde 3,50 m hasta 6,50.

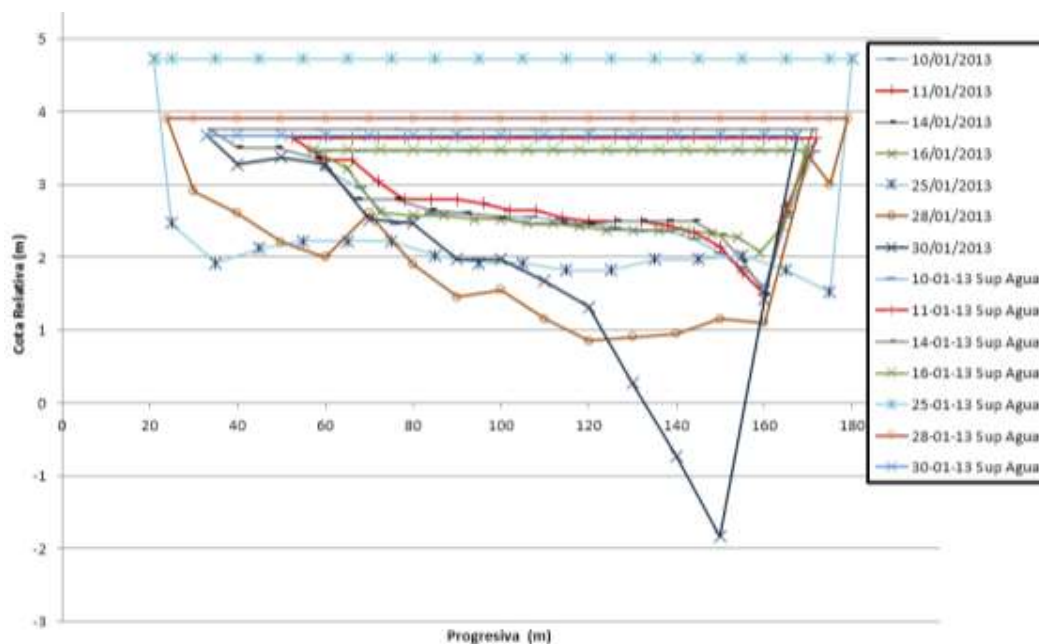


Figura 198.- Movimiento del Fondo y Superficie de Agua, Crecida año 2013.

Se observa que el fondo ha descendido desde 1,80 m de lectura de escala hasta los -1,90 m, es decir 3,70 m.

Para Villamontes no se poseen aforos para el mes de enero de 2013, por lo que no se puede realizar el análisis.

8.2. Análisis de la Crecida del año 2014

En este apartado se presenta la crecida del año 2014, correspondiente al año hidrológico 2013. Para este evento la disponibilidad de información permite analizar la totalidad de los pasos de la metodología.

8.2.1. Niveles de agua (Lecturas de escala hidrométrica)

Se utilizaron una vez más las lecturas de niveles horarias de VM y MLP que la Dirección Ejecutiva para el Desarrollo de la Cuenca Trinacional del río Pilcomayo (2015) ofrece en su sitio de internet www.pilcomayo.net, las que se presentan de forma gráfica en la Figura 199. En algunos casos hay discontinuidades en las series, en estos casos se rellenan usando interpolación lineal.

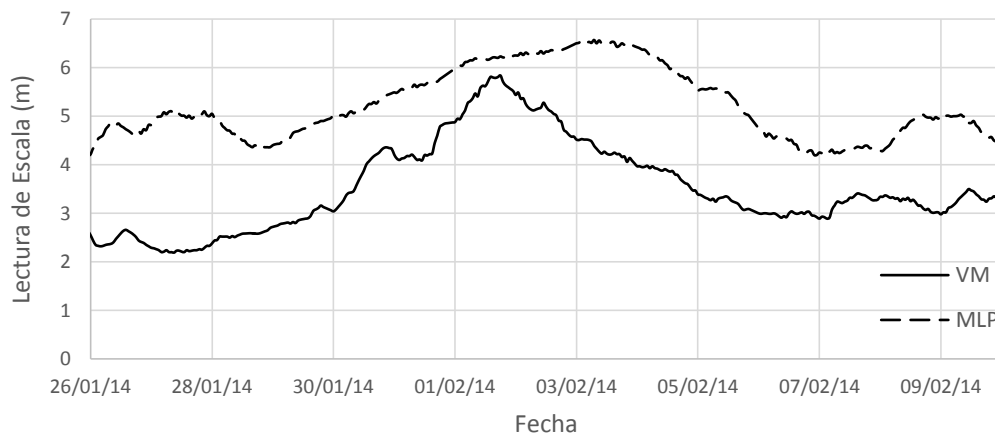


Figura 199.- Lecturas de escala medias horarias para Villamontes y Misión La Paz, 2014.

8.2.2. Obtención de Hidrogramas

Se obtienen las curvas de relación altura-caudal (H-Q) a partir de aforos. Para convertir las lecturas de escalas en caudales en Villamontes, se aplica la ecuación: $Q = 187.1 (H - 0.48)^{5/3}$ (Testa Tacchino, 2015) para fechas a partir del año 2004. Para Misión La Paz se obtiene la H-Q a partir de los aforos durante la crecida (enero – febrero 2014). Los resultados se presentan en la Figura 200, además se muestran las fechas para las cuales se poseen imágenes satelitales Landsat: 5 y 6 de febrero de 2014 (Img. 2014036 e Img. 2014037). La diferencia de volúmenes entre desbordes es de 93 hm^3 y El periodo de retorno calculado a partir de la ecuación propuesta para MLP en el Capítulo 4 es de 1,1 años.

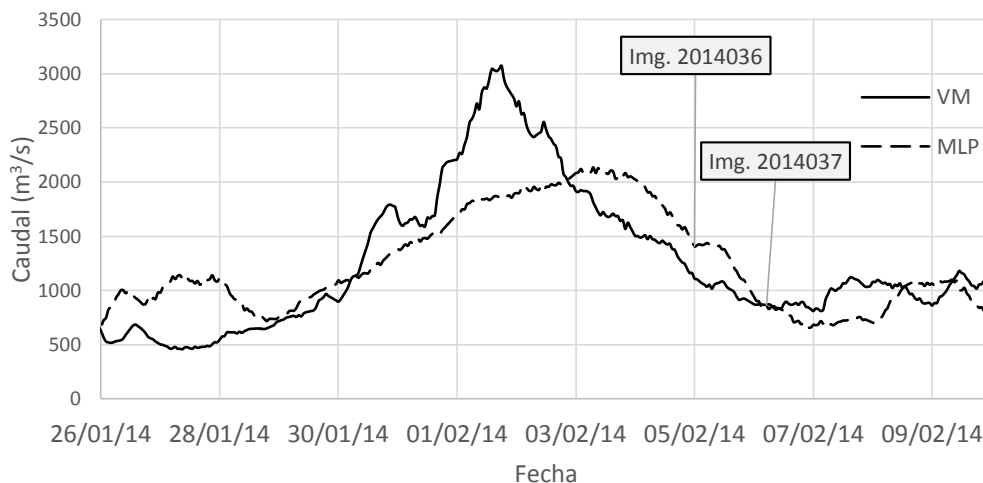


Figura 200.- Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz, 2014.

8.2.3. Análisis de niveles de agua (Lecturas de Escala hidrométrica)

Estudiando las lecturas de niveles horarios (Figura 201) proporcionadas por un sensor de radar, se estimó el tiempo de traslado de la crecida. La velocidad a la que viaja no es constante sino que depende del caudal y el tirante en cada momento. Se ha determinado que el caudal pico demoró 31 horas en llegar de VM a MLP, y considerando que la distancia por el cauce entre las dos estaciones es de 193.6 km, se obtiene que la velocidad media del caudal pico es de aproximadamente 1.7 m/s.

Además se calculó que el tiempo base del hidrograma de Villamontes es 6 días 6 horas y el de Misión La Paz de 9 días 3 horas y una duración del pico de 2 días 18 horas.

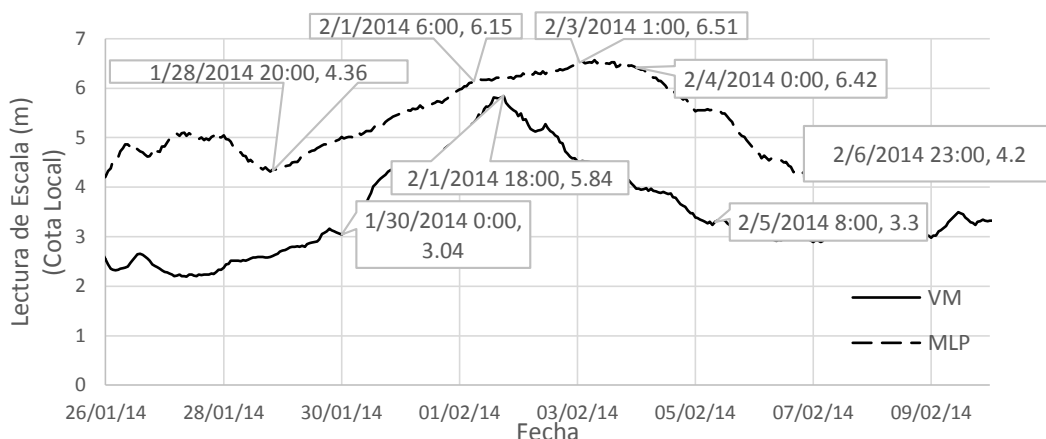


Figura 201.- Niveles base y pico de la crecida en VM y MLP, 2014.

8.2.4. Análisis de Imágenes Satelitales

Para el análisis de esta crecida se utilizaron imágenes Landsat 7 y 8. Para la crecida en estudio se han conseguido dos imágenes de la zona de desborde, la primera del día 5 de Febrero a las 21:48 horas de Landsat 8 ($Q=995 \text{ m}^3/\text{s}$ en VM y $921 \text{ m}^3/\text{s}$ en MLP) y otra del día 6 de Febrero a las 11:00 horas de Landsat 7 ($Q=876 \text{ m}^3/\text{s}$ en VM y $624 \text{ m}^3/\text{s}$ en MLP). Para el análisis se trabajó con la combinación de bandas (5,4,3) para la imagen Landsat 7, y con las bandas (6,5,4) para la imagen Landsat 8.

El área inundada por El Chañaral para el día 5 de febrero fue de 114.19 km^2 con una longitud de 47.78 km y para el día 6 de febrero de 116 km^2 de superficie y 48.5 km de longitud. Se toma como longitud representativa del desborde la máxima extensión de la zona inundada. El pico de caudal fue de $3071 \text{ m}^3/\text{s}$ el 2 de febrero en VM y de $2137 \text{ m}^3/\text{s}$ el día 3 de febrero en MLP. Los caudales mencionados precedentemente fueron obtenidos a partir de curvas H-Q. En la Figura 202 se identificaron los desbordamientos activos y la Tabla 3 presenta un resumen de los resultados obtenidos del análisis de las imágenes.

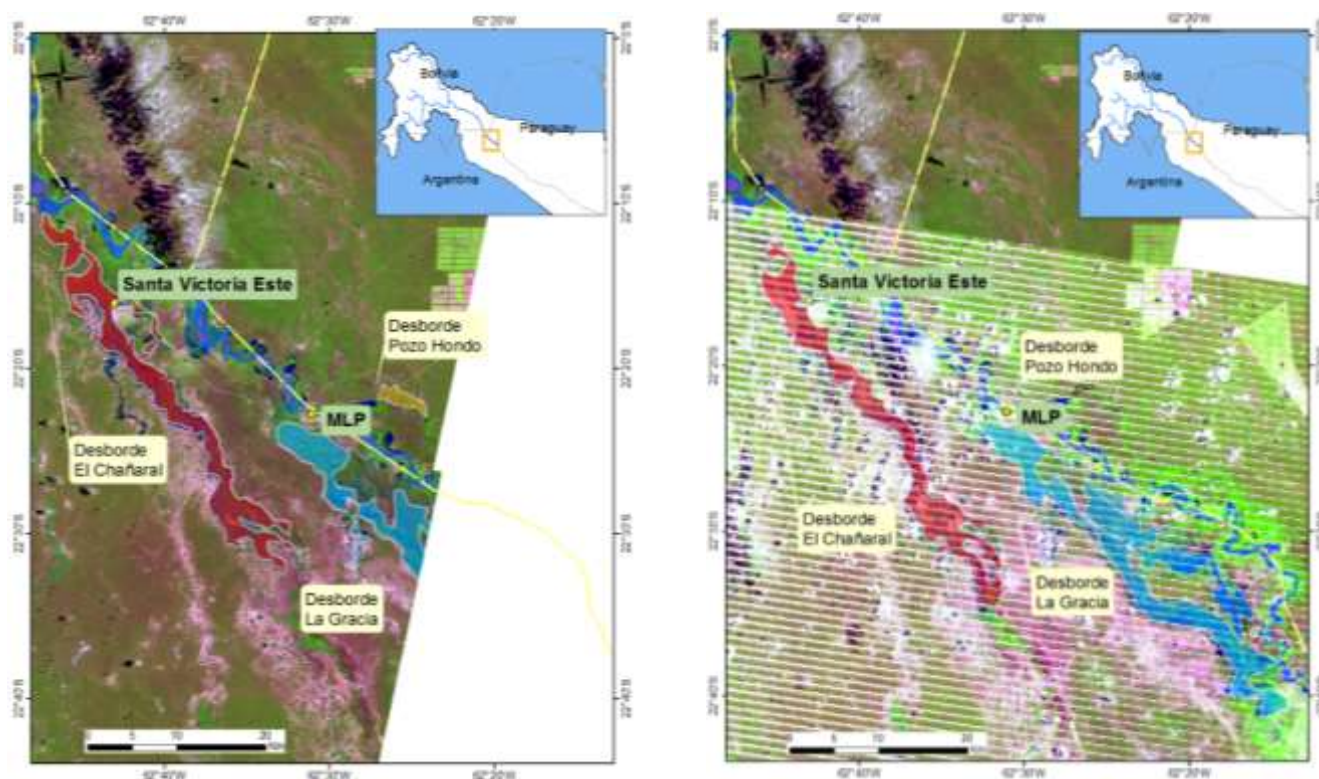


Figura 202.- Delimitación de desbordes, (Izq.) Imagen Landsat 8, 5/2/2014
Der.) Imagen Landsat 7, 6/02/2014

Tabla 33.- Tabla resumen de las características de los desborde para el año 2014. a) Duración de desborde,
b) Longitud y Área de desborde.

C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C9 (C5 - C3)	C10 (C2 - C5)
Imagen	Fecha img dd/mm/año	Fecha del Pico VM dd/mm/año	Qp VM m ³ /s	Fecha del Pico MLP dd/mm/año	Qp MLP m ³ /s	Q VM m ³ /s	Q MLP m ³ /s	ΔT pico días	ΔT img y pico MLP días
2014036	05/02/2014	01/02/2014	3071	03/02/2014	2137	1035	1336	2	2
2014037	06/02/2014	01/02/2014	3071	03/02/2014	2137	867	797	2	3

		Desbordes							
		El Chañaral		La Gracia		Pozo Hondo		La Puerta	
Imagen	Fecha dd/mm/año	Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²	Longitud km	Área km ²
2014036	05/02/2014	47.71	115.78	28.27	111.72	5.40	6.96	Sin Visibilidad	Sin Vis.
2014037	06/02/2014	49.81	122.22			2.27	0.98		

Para el año 2014 se activaron los cuatro desbordes: El Chañaral, La Gracia, Pozo Hondo y La Puerta. El desborde La Puerta no pudo ser analizado por haber sombras de nubes en su zona de influencia.

8.2.5. Resultado del Análisis de la crecida y comparación con las de años anteriores

Se ha establecido para el desborde El Chañaral una relación entre el tiempo, en días, desde que se activa el desborde hasta el momento de la imagen satelital y la velocidad media de avance del desborde, en kilómetros por día.

$$V_{avance} \left[\frac{km}{día} \right] = 30.233 t^{0.851} [día]$$

En la Figura 202 al contrastar las dos imágenes se observa el avance del frente del desborde El Chañaral que totaliza 3740 m en cerca de 14 horas, resultando en una velocidad de avance de 6.80 km/día. Se calculó en el 6.2.2.3 que en el año 2006 el frente avanzó 7.2 km en 8 días (tiempo entre dos imágenes disponibles) o una velocidad de avance media de 900 m/día (Testa Tacchino, y otros, 2014). Se ha podido observar que la velocidad de avance del desborde es relativamente mayor durante el primer día, contabilizando desde que se activa el desborde, y que luego va disminuyendo a medida transcurren los días, esto se manifiesta en la diferencia de velocidades medias al promediarlas en 14 horas (año 2014) y 8 días (año 2006). La Figura 203 presenta los valores históricos y los correspondientes a las dos imágenes disponibles del año 2014 de esta relación. Se observa que los puntos del año 2014 ajustan bien con respecto a lo previamente establecido en Testa Tacchino (2015). Esta figura además permite establecer cuantos kilómetros recorre por día la mancha de inundación.

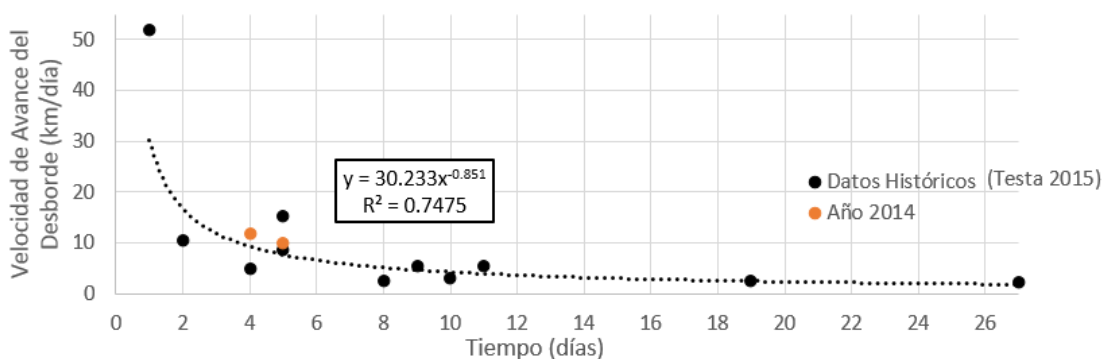


Figura 203.- Días desde que se activa el desborde vs velocidad de avance (distancia / días recorridos por el desborde hasta la fecha de la imagen).

La Figura 204 presenta los resultados del año 2014 para las imágenes del 5 y 6 de febrero en comparación con los datos históricos. Esta figura es válida para los cuatro desbordes. Se observa una buena coincidencia. En el caso de El Chañaral, una vez calculada la distancia recorrida por el desborde con la Figura 203, se puede calcular el área inundada con la Figura 204.

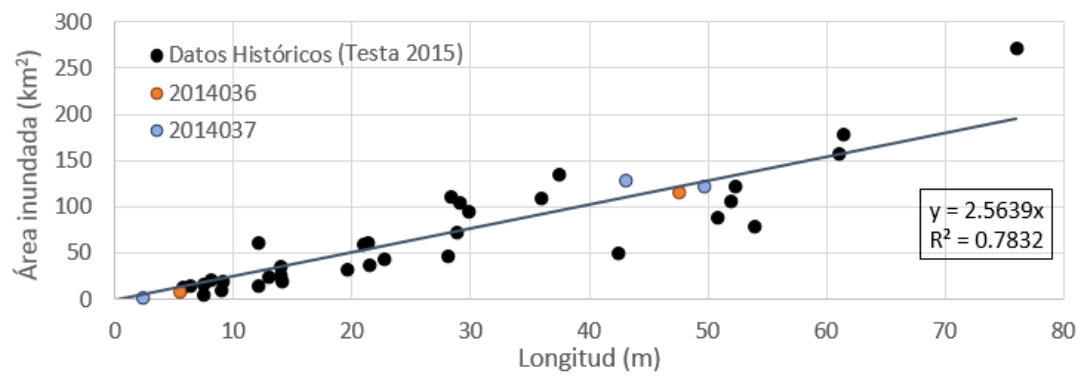


Figura 204.- Relación entre área inundada y extensión del desborde.

8.2.6. Comparación con desbordes anteriores, mediante GIS.

Las nuevas zonas inundadas que se observaron en el año 2013, marcadas en blanco en la figura y detalladas en el capítulo 8.1.6, no se observaron en el año 2014.

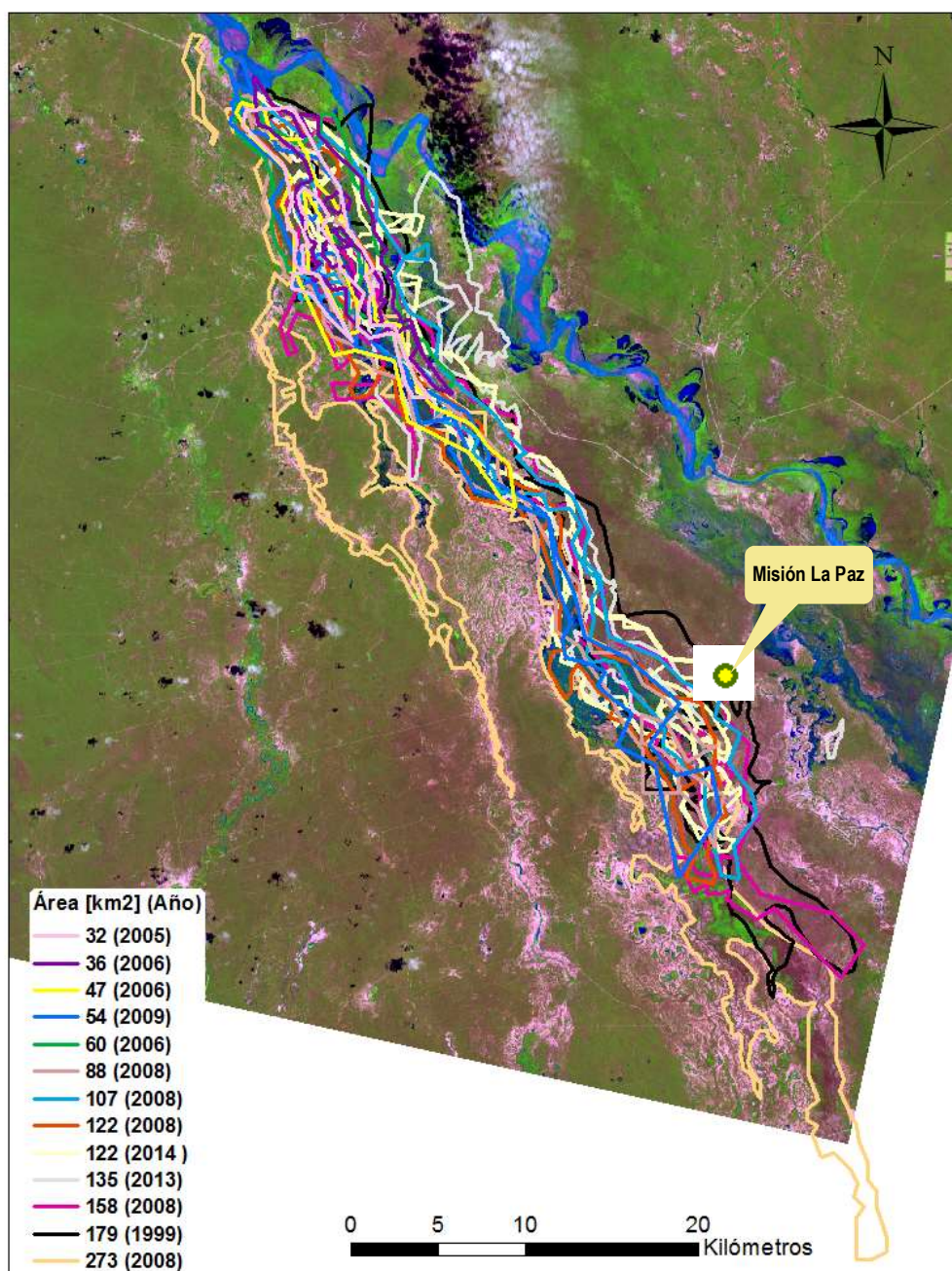


Figura 205.- Contornos de áreas inundadas por el desborde El Chañaral en diferentes eventos según extensión [km²]

8.2.7. Aplicación del modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS)

Se ha modelado hidráulicamente el tránsito de una onda de crecida en el Río Pilcomayo en una dimensión, a régimen no permanente y de fondo fijo utilizando el programa conocido como HEC-RAS 4.1.0 (USACE, 2010). Con el objetivo de ver qué sucede con el hidrograma al haber una pérdida de caudal consecuencia de los desbordes, se simuló un vertedero lateral en la progresiva correspondiente al desborde El Chañaral (Progresiva aguas abajo de VM: 70260 m). Se analizó el tramo con un solo vertedero lateral que simularía los cuatro desbordes, en trabajos futuros se pueden proponer estudios con

múltiples vertederos. La cresta del vertedero lateral se tomó igual al punto más bajo de la margen derecha del río a la altura del Chañaral (cota 273 m s. n. m.).

El modelo fue calibrado a partir de hidrogramas observados en Villamontes, sección de entrada al modelo, y en Misión La Paz, sección de salida del modelo. Se compararon los hidrogramas observados con los hidrogramas modelados en Misión La Paz para ajustar los coeficientes del modelo hasta lograr una óptima aproximación a crecidas de las que se poseen registros. Posteriormente se utilizaron crecidas, que no fueron utilizadas para la calibración, para la verificación del modelo, es decir se superpusieron los resultados del modelo con los observados, pero ya sin modificar coeficientes, este es el caso de la crecida presentada en este trabajo.

La Figura 206 presenta los resultados de la modelación hidrodinámica comparados con el hidrograma observado, se observó que hay una diferencia de 10 horas en el arribo del pico, no obstante si se considera el frente de crecida como el punto en el que el caudal alcanza los 1700 m³/s, la diferencia es de una hora. Este es el punto que se ha fijado en trabajos anteriores. También se obtuvo que el volumen de agua calculado es un 11% menor que el observado en MLP. Al igual que en modelaciones de crecidas anteriores, se observa un defecto de volumen en la rama ascendente y exceso en la rama descendente del hidrograma que probablemente se debe a que se ha considerado un solo vertedero lateral para representar los cuatro desbordes principales que ocurren en el tramo.

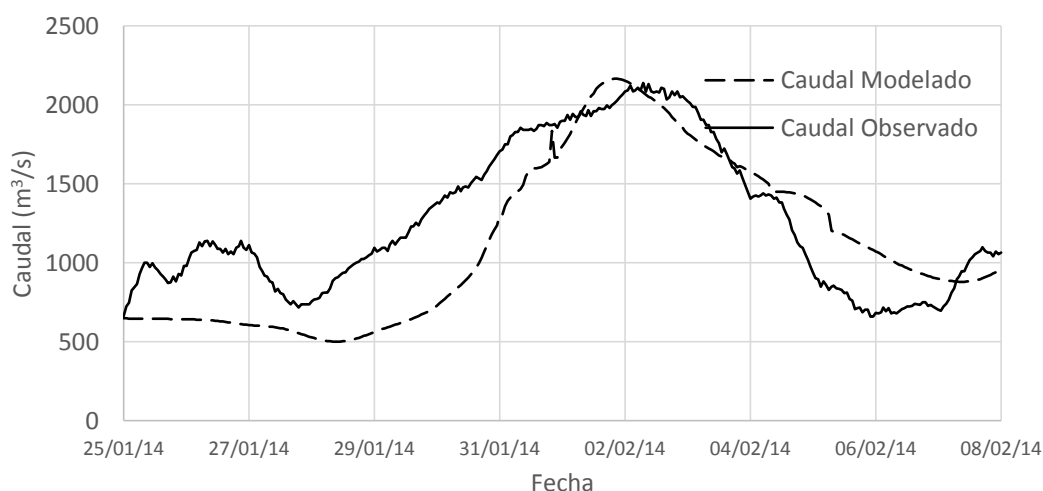


Figura 206.- Comparación de hidrogramas modelado y observado en MLP.

La modelación ha permitido tener una primera aproximación al hidrograma de desborde, del cual no se poseía ningún tipo de información hasta el momento, ya que es muy difícil de aforarlos por su inaccesibilidad e inexistencia de infraestructura, que se presenta en la Figura 207.

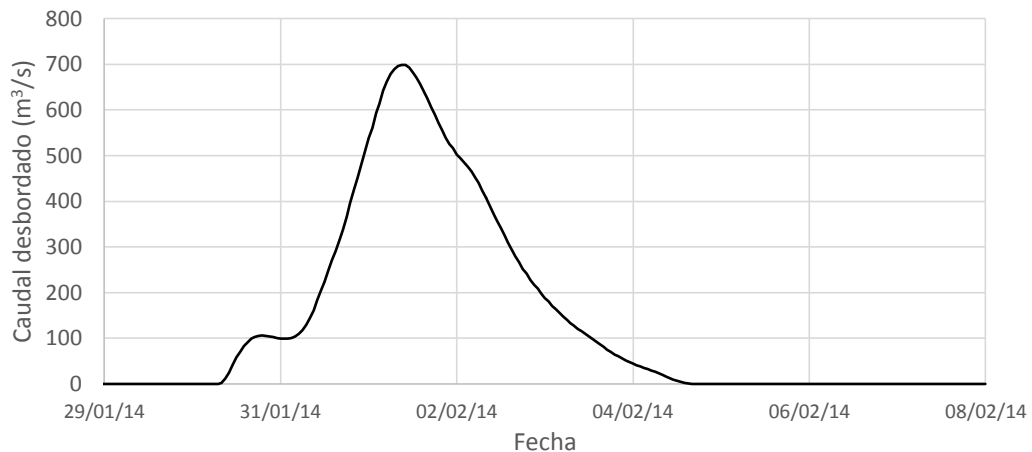


Figura 207.- Hidrograma simulado del desborde concentrado en El Chañaral para la crecida del año 2014.

8.2.8. Movimiento del Lecho en las estaciones de Villamontes y Misión La Paz

Para el año 2014 se realizaron dos campañas de aforos y reconocimiento del Río Pilcomayo, la primera se realizó entre el 13 y el 24 de enero de 2014, antes del paso del pico de la crecida y la segunda entre el 19 y el 23 de febrero de 2014 después del paso del pico de la crecida. Las campañas se formalizaron con medios de la Dirección Ejecutiva de la Comisión Trinacional para el Desarrollo de la Cuenca del Río Pilcomayo.

La Figura 47 presenta la variación del fondo de la sección de aforo en Villamontes, consecuencia de la erosión general transitoria antes del paso de la crecida de enero de 2014 y la Figura 48 presenta los niveles según lecturas de escala para este periodo. La Figura 49 presenta el movimiento del fondo después del paso de la crecida en el mes de febrero y la Figura 211 presenta las lecturas de escala para este periodo. El cero de la escala en la sección de aforo de Villamontes corresponde a los 383 m s. n. m. y el cero de la escala en la sección de aforo en Misión La Paz a los 230 m. s. n. m.

Al observar el movimiento del fondo, se puede señalar que el lecho se encontraba en el orden de los -2.50 m de lectura de escala en cota local antes del paso de la crecida y luego del paso de la crecida el punto más bajo del lecho se encuentra a los -7.00 m (21/02/2014), para ir subiendo nuevamente con el transcurso de los días hasta los -4.60 m en el periodo analizado (25/02/2014). Se observa también que para igual lectura de escala la sección es muy distinta si es la rama del hidrograma es la ascendente o la descendente. Se constata que es muy importante tener presente la variabilidad del fondo en el momento de utilizar o calcular las curvas de relación altura-caudal (H-Q) en la sección.

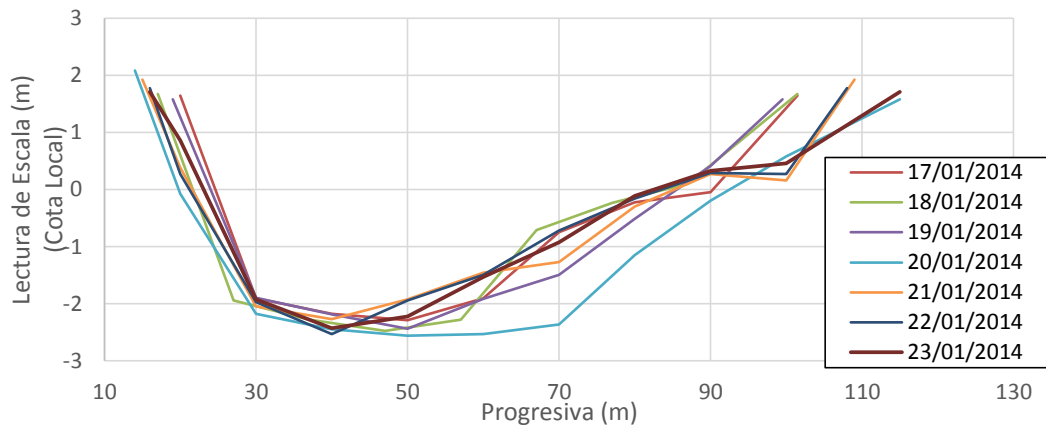


Figura 208.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, enero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)

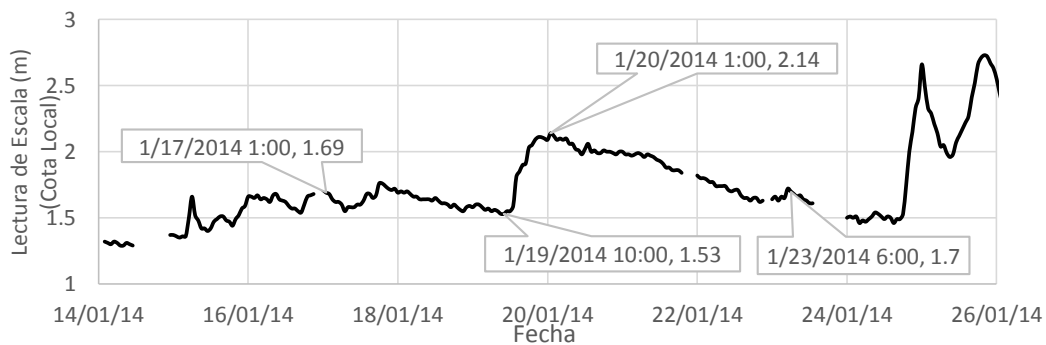


Figura 209.- Niveles durante aforos, enero 2014. Elaboración Propia a partir de: (Laboranti, 2014)

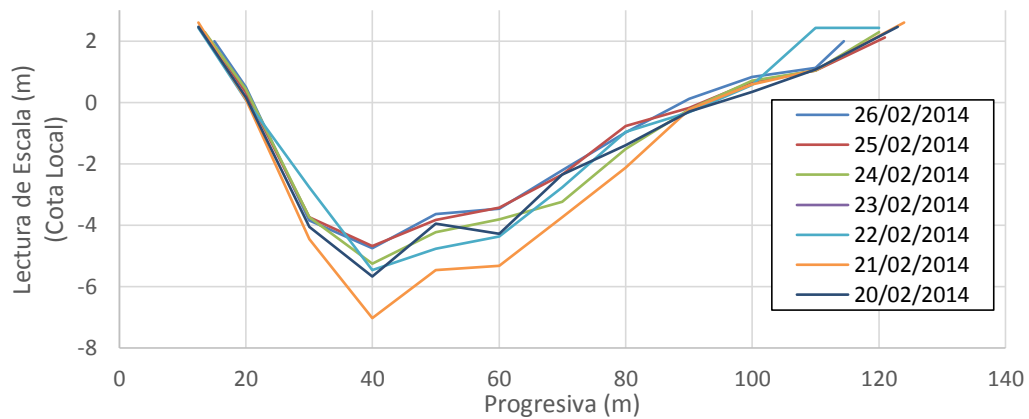


Figura 210.- Movimiento del fondo en Villamontes en periodo de aguas medias, febrero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)

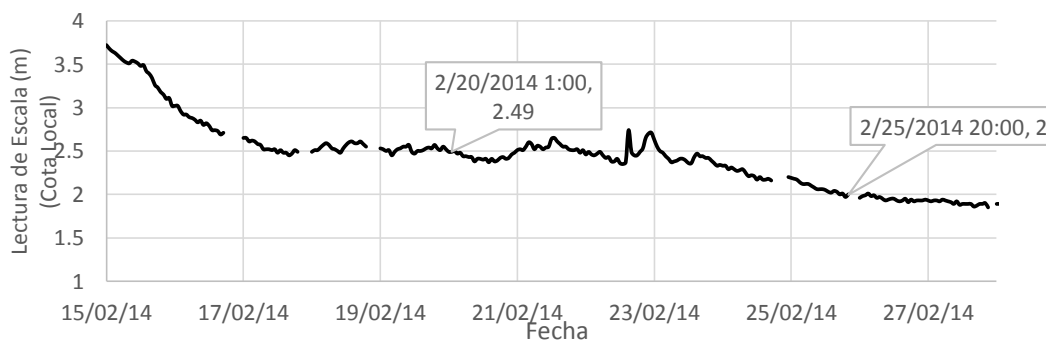


Figura 211.- Niveles durante aforos, febrero 2014. Elaboración propia a partir de: (Laboranti, 2014)

La Figura 61 muestra una variación significativa de la sección transversal durante aforos diarios en Misión La Paz en enero de 2014 y la Figura 62 presenta los niveles registrados. Se observa que el punto más bajo del lecho ha descendido hasta 1.3 m con efectos también de mucho movimiento en el resto del fondo. En MLP no se posee información después del paso de la crecida, en la rama descendente del hidrograma, ya que debido a los desbordes y lluvias intensas fue imposible el ingreso a la localidad.

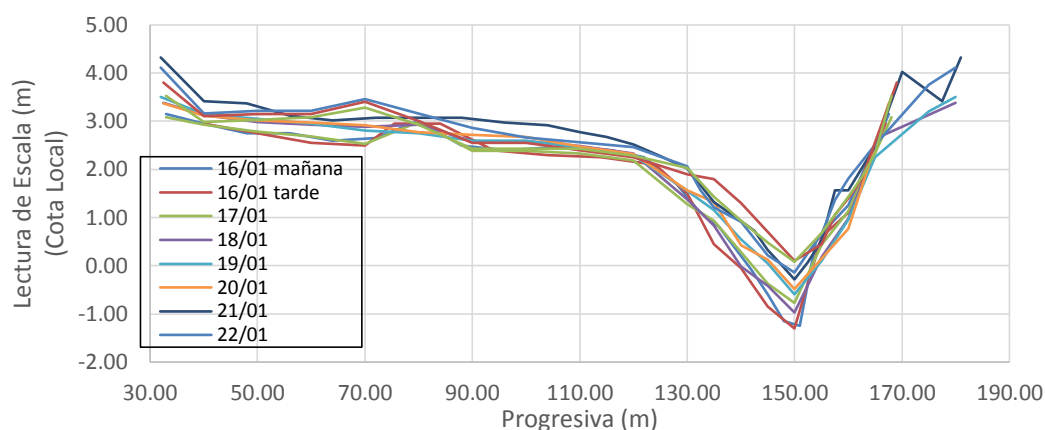


Figura 212.- Movimiento del fondo en Misión La Paz en periodo de aguas medias, enero 2014. (Cristanchi y Testa Tacchino, 2014)

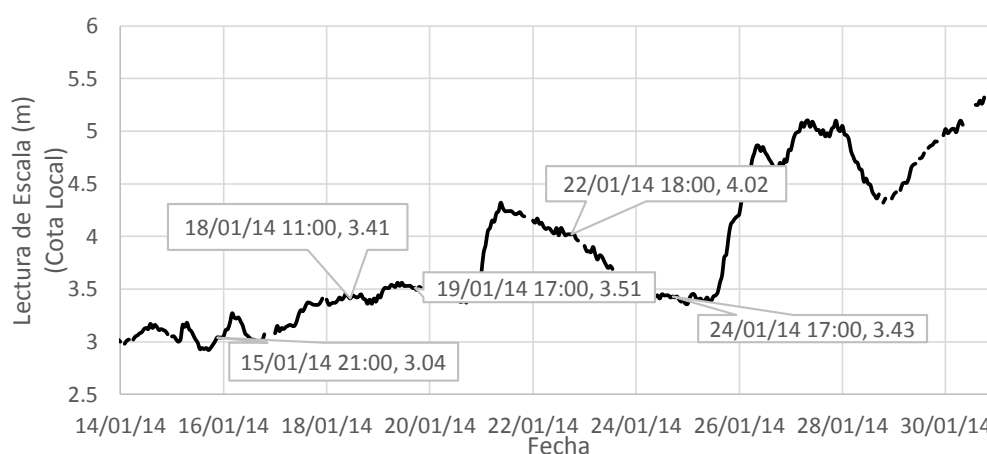


Figura 213.- Niveles durante aforos, 2014 en MLP. (Cristanchi y Testa Tacchino, 2014)

8.3. Análisis de la Crecida del año 2015

Se presenta a continuación el análisis de la crecida del año 2015, correspondiente al año hidrológico 2014.

8.3.1. Niveles de agua (Lecturas de escala hidrométrica)

Se poseen las lecturas de escala horarias para VM y MLP, que se presentan en la **Figura 214**.

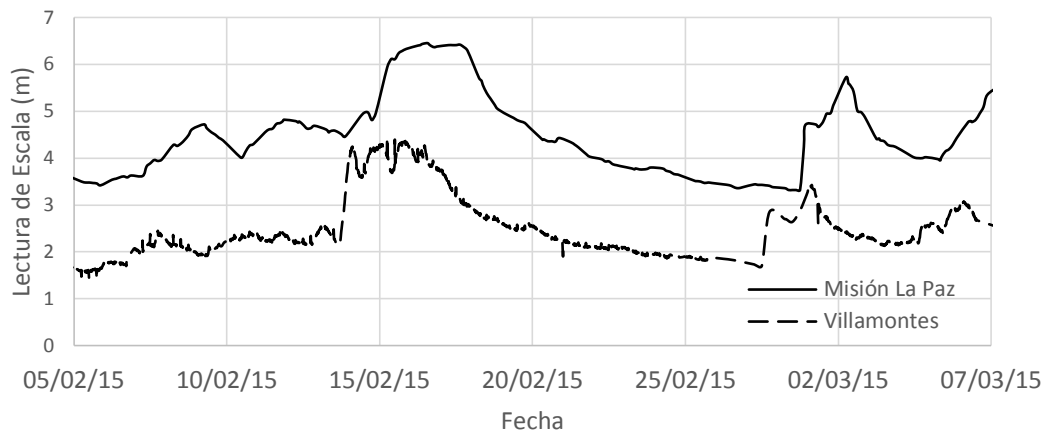


Figura 214.- Lecturas de escala medias horarias para Villamontes y Misión La Paz, 2015.

8.3.2. Obtención de Hidrogramas

Se obtienen las curvas altura-caudal. Para Villamontes se aplica la formulación presentada en el inciso 3.1. Para Misión La Paz se obtiene la h-q a partir de los aforos con diferentes formulaciones para la rama ascendente y descendente. Los resultados se presentan en la **Figura 215**. El periodo de retorno calculado a partir de la ecuación propuesta para MLP en el Capítulo 4 es de 2,7 años.

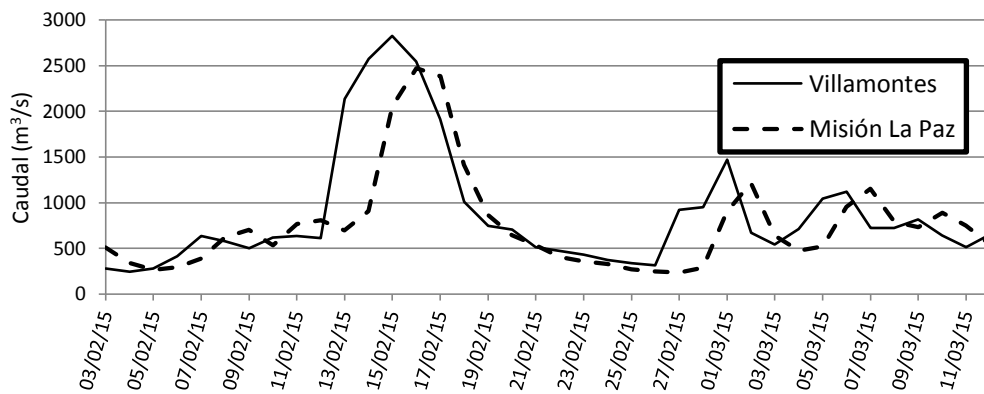


Figura 215.- Hidrogramas calculados para Villamontes y Misión La Paz, 2015.

8.3.3. Análisis de niveles de agua (Lecturas de Escala hidrométrica)

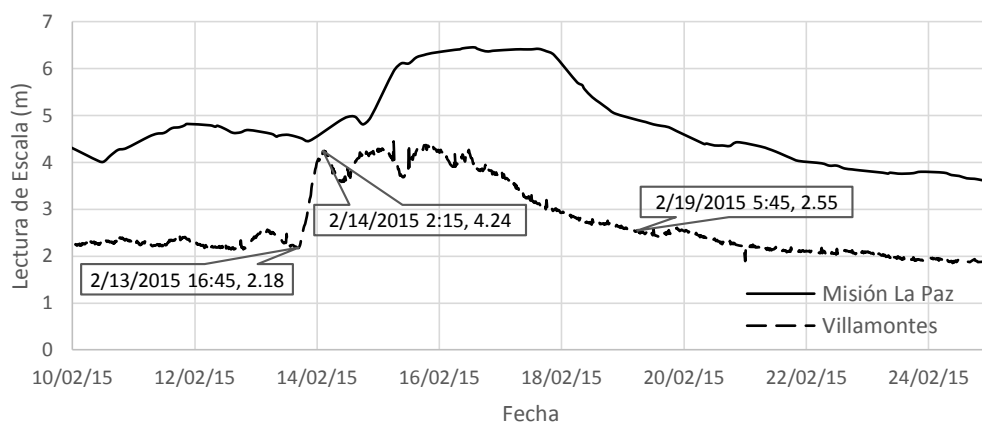


Figura 216.- Niveles base y pico de la crecida en VM y MLP, 2015.

8.3.4. Análisis de Imágenes Satelitales

Para la crecida del año 2015 se obtuvo la imagen con fecha 17 de febrero, que se presenta en la Figura 217, solamente es posible observar el desborde La Gracia, ya que los otros desbordes no se encuentran visibles por la presencia de nubes.

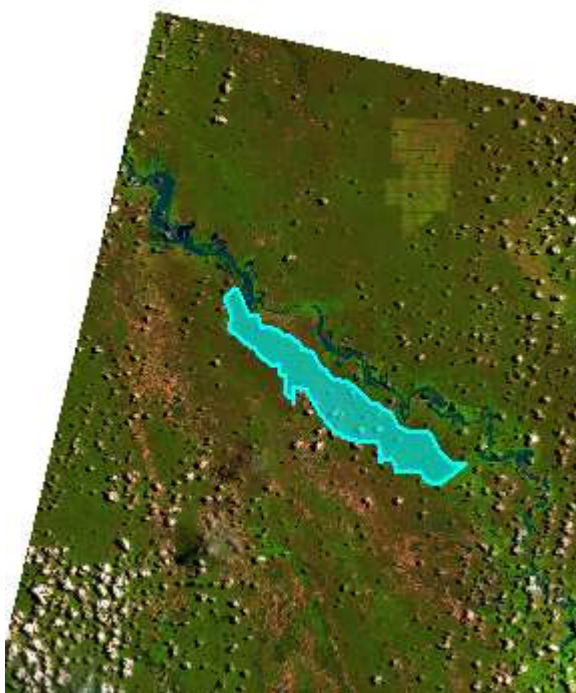


Figura 217.- Delimitación de desborde, Imagen Landsat 8, 17/2/2015

8.3.5. Resultado del Análisis de la crecida y comparación con las de años anteriores

A partir de los datos recolectados en los análisis anteriores se obtienen las áreas de desborde, las longitudes afectadas, el volumen desbordado y velocidad de avance del desborde. Los resultados para esta crecida se presentan en la Tabla 34 y se comparan con los valores de años anteriores como se presentó en el capítulo 6. Para este año la diferencia de volúmenes que pasa por VM y luego por Misión La Paz es de 255 hm³ y el periodo de retorno del evento, obtenido a partir de 4.1 es de 2,7 años

Tabla 34.- Caudal pico del hidrograma de crecida y Caudal en la fecha de la imagen; Longitud y áreas de las zonas inundadas por los desbordes.

Imagen	Fecha	Fecha del Pico VM	Q _p VM m ³ /s	Fecha del Pico MLP	Q _p MLP m ³ /s	Q VM m ³ /s	Q MLP m ³ /s	ΔT _{pico} días	Desbordes hacia Argentina					
									El Chañaral			La Gracia		
									Longitud m	Longitud km	Área km ²	Longitud m	Longitud km	Área km ²
2015048	2/17/2015	15/02/15	2823.7	16/02/15	2471.4	1913.5	2384.7	1				31208.2	31.2	112.3

Los valores obtenidos se grafican en conjunto con los obtenidos en años anteriores. En el caso del desborde la Gracia, único presente en la imagen satelital disponible, no se ha podido establecer una relación entre la velocidad de avance y el tiempo transcurrido desde que se activa el desborde. No obstante si se cumple la relación entre las longitudes y las áreas inundadas (Figura 218) ya que han mostrado tener una buena relación y otra que se pueda proponer que despierte el interés.

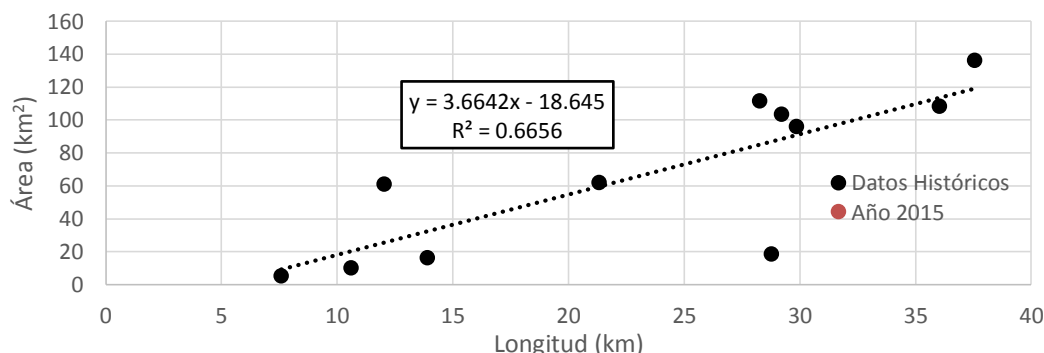


Figura 218.- Relación Área Inundada vs Longitud del desborde La Gracia.

8.3.6. Comparación con desbordes anteriores, mediante GIS.

No se registró el desborde El Chañaral con imágenes satelitales para el evento del año 2015, por lo que no se ha podido.

8.3.7. Aplicación del modelo hidráulico unidimensional (HEC-RAS)

La Figura 219 presenta el caudal que arriba a Misión La Paz obtenido de la modelación hidráulica unidimensional contrastado con el caudal medido en la sección y la Figura 220 presenta el hidrograma modelado del desborde. La diferencia de volúmenes entre hidrogramas es de 3.03 hm³.

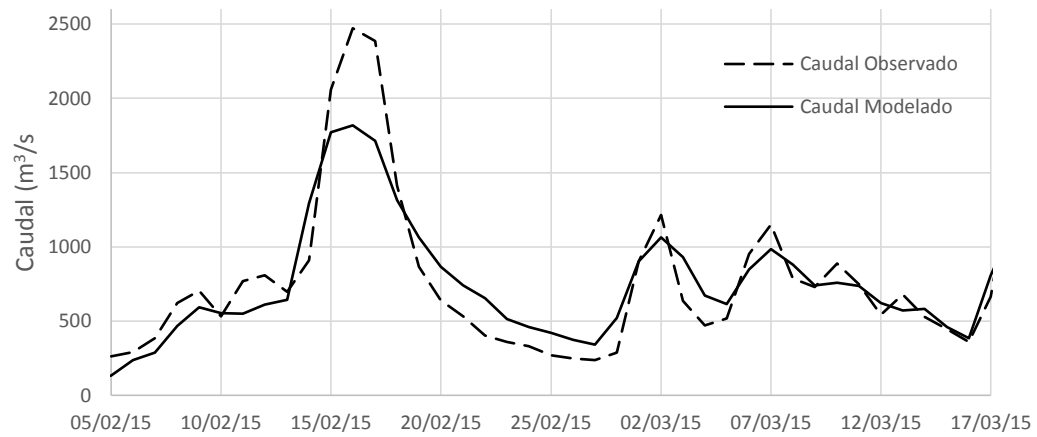


Figura 219.- Comparación de hidrogramas modelado y observado, en MLP.

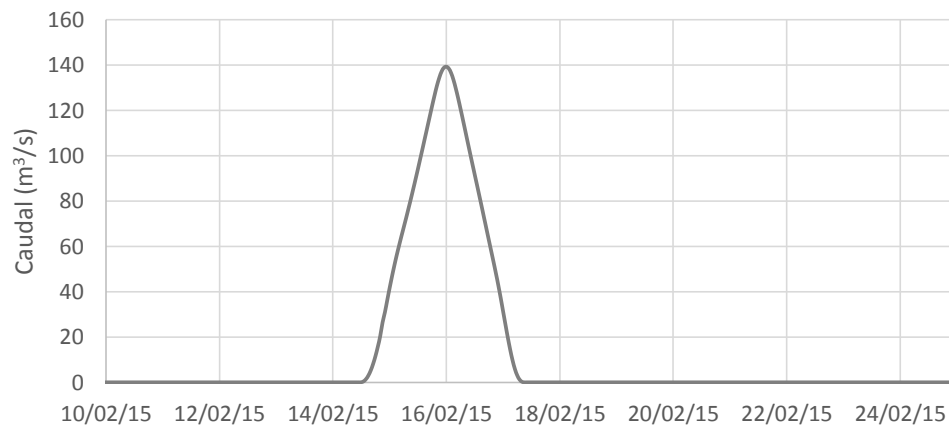


Figura 220.- Hidrograma simulado del desborde concentrado en El Chañaral para la crecida del año 2015.

8.3.8. Movimiento del Lecho en las estaciones de Villamontes y Misión La Paz

Para este año no se posee información de aforos durante el paso de la crecida, ni en la rama ascendente ni en la rama decente.

9. Análisis de resultados y conclusiones

En esta tesis se caracterizó hidráulicamente el tramo del Río Pilcomayo comprendido entre Villamontes (VM) y Misión La Paz (MLP) mediante el análisis de datos de aforos líquidos, sólidos, batimetrías, curvas altura-caudal, imágenes satelitales y análisis de probabilidades de excedencia de caudales, para series históricas medidas durante más de 35 años en VM y 50 años en MLP con el objetivo de aportar herramientas técnicas al estudio de la distribución de caudales entre los tres países que forman parte de la cuenca.

Se pudo establecer que los desbordes se activan en el siguiente orden: El Chañaral, La Gracia, y luego, con muy poca diferencia temporal La Puerta y Pozo Hondo. Se concluye que El Chañaral y La Gracia han desbordado para caudales de $2700 \text{ m}^3/\text{s}$, estos son los principales desbordes en magnitud y persistencia y ambos vierten sus aguas para Argentina. Los desbordes La Puerta y Pozo Hondo, de menor magnitud y persistencia, vierten sus aguas por margen izquierda hacia Bolivia y Paraguay respectivamente. Todos los desbordes se encuentran activos cuando el caudal del pico en Villamontes es de $3500 \text{ m}^3/\text{s}$. Se ha evaluado el efecto de los desbordes aguas arriba de Misión La Paz que regulan el caudal que llega a esta ciudad, que para el periodo en estudio, no supera los $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ incluso si el caudal en VM es cercano a los $7000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se ha determinado que para una diferencia de volúmenes de 495 hm^3 entre VM y MLP, en el año 2006, con un hidrograma de 3 años de periodo de retorno, se logra evacuar toda el agua de las zonas inundadas por los desbordes en 10 días desde el paso del pico por Misión La Paz. En el año 2008, con un hidrograma de 17 años de recurrencia, se observó mayor persistencia de la mancha de inundación, evacuándose en 12 días el agua de los desbordes de Pozo Hondo y La Puerta, encontrándose todavía agua en los desbordes El Chañaral y La Gracia. Así mismo, se ha establecido que se podría hablar de tasa de reducción de área inundada de referencia entre $1,9 \text{ km}^2/\text{día}$ y $4,5 \text{ km}^2/\text{día}$ para El Chañaral y entre $7,5 \text{ km}^2/\text{día}$ y $9 \text{ km}^2/\text{día}$ para La Gracia.

A partir del análisis de curvas de excedencias de caudales para las estaciones de Villamontes y Misión La Paz se concluyó que hay pérdidas de $15 \text{ m}^3/\text{s}$ entre VM y MLP con una excedencia superior al 2 % que nos indica las pérdidas por evapotranspiración e infiltración en estiaje. Al disminuir la probabilidad de excedencia la diferencia entre curvas aumenta, pudiendo indicar pérdidas por infiltración para caudales en épocas de aguas altas. Las primeras pérdidas por desbordes de moderada magnitud ocurren para caudales de $2551 \text{ m}^3/\text{s}$ en VM y de $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ en MLP, Valores muy próximos a los que se deducen por el análisis de hidrogramas e imágenes satelitales. Caudales de $3817 \text{ m}^3/\text{s}$ en VM y $2613 \text{ m}^3/\text{s}$ en MLP, con una probabilidad de excedencia de 2 ‰, producen grandes desbordes de aproximadamente $800 \text{ m}^3/\text{s}$. Estos valores son congruentes con los que se observaron a partir de las imágenes satelitales cuando están activos los cuatro desbordes mencionados.

La modelación hidráulica bidimensional permitió estimar para los escenarios estudiados que el caudal desbordado por El Chañaral implica un 15% del caudal pico de la crecida cuando este está comprendido entre $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ y $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ y un 25% del caudal pico para caudales entre $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $5000 \text{ m}^3/\text{s}$. Además, en las crecidas estudiadas a partir de los

hidrogramas e imágenes satelitales se ha verificado que los desbordes naturales implican por encima de los 255 hm³ para crecidas con periodo de recurrencia entre 2 y 3 años y de 90 hm³ para crecida de 1,1 año de periodo de retorno.

En esta tesis se demuestra la importancia de los volúmenes vertidos por los desbordes y se sienta un antecedente para impulsar el estudio de los caudales de los desbordes naturales aguas arriba de “La Embocadura”.

Con el enfoque en los resultados anteriores se estableció un método para el análisis de crecidas, que en esta tesis se presentó para las crecidas del año 2013, 2014 y 2015 estudiándolas con información disponible de crecidas anteriores.

Bibliografía

- Amarilla, L. (2014). Logros y Metas en Obras del Pilcomayo. Paraguay.
- Amarilla, M. (2005). *Proyecto de Defensa para la localidad de El Potrillo y su zona de influencia debido a los desbordes del Río Pilcomayo, al Noroeste de la Provincia de Formosa*.
- Andréassian, V., Perrin, C., Berthet, L., Le Moine, N., Lerat, J., Loumagne, C., . . . Valery, A. (2009). Crash tests for a standardized evaluation of hydrological models. . Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Volume 6.
- Ashworth, P. J., Best, J. L., & Jones, M. A. (2007). The relationship between channel avulsion, flow occupancy and aggradation in braided rivers: Insights from an experimental model. *Sedimentology*, 54(3), 497-513. doi:10.1111/j.1365-3091.2006.00845.x
- Baldissoni, M. (2013). Estudio del Sistema Fluvial Embocadura del Río Pilcomayo para la Evaluación de la Distribución de Caudales entre Argentina y Paraguay. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba - Tesis de Maestría.
- Baldissoni, M., Cristanchi, A., & Testa Tacchino, A. (Septiembre de 2013). Informe Interno, campaña Septiembre 2013. Misión la Paz.
- Baldissoni, M., Cristanchi, A., & Testa Tacchino, A. J. (Septiembre de 2013). Informe Interno, campaña Septiembre 2013. Misión la Paz.
- Berthet, L. (2010). Prévion des crues au pas de temps horaire: pour une meilleure E21assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. PhD Thesis de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement AgroParisTech.
- BIOSIS. (2014). Informe Final - Reparación y Rehabilitación de Estaciones automáticas de Medición en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo. Cochambamba, Bolivia.
- Blade, E., Sánchez-Juni, M., Sánchez, H. P., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable. Edicions UPC.
- Brea, J. D., & Spalletti, P. (2011). Avances, retrocesos y estancamientos sobre el conocimiento de los procesos fluviales del Río Pilcomayo. Ríos 2011.
- Brea, J. D., Spalletti, P., Irigoyen, M. A., Hillman, G., Gyssels, P., & Baldissoni, C. M. (Mayo de 2014). Modelación Matemática del Río Pilcomayo en la zona de la Embocadura. *Informe Final*. La Plata: UNLP.
- Bryant, M., Falk, P., & Paola, C. (1995). *Experimental study of avulsion frequency and rate of deposition* (Vol. 23). Minnesota. doi:10.1130/0091-7613(1995)023<0365:ESOFAFA>2.3.CO

- Caccato, M. (2000). *Diseño Preliminar de las Estaciones Hidrometeorológicas del Río Pilcomayo*.
- Cafaro, E. D. (2007). *Evaluación de la información necesaria para el Diagnostico de una posible zona de avulsión del rio Pilcomayo*. Santa Fe.
- Cafaro, E. D. (2010). *Estabilización del cauce principal y márgenes del río Pilcomayo en segmentos identificados como puntos críticos, tramo: Hito 1 / D'orbigny – el Pantalón. Análisis Geomorfológico*.
- Cafaro, E. D., & Ramonell, C. G. (2007). Evaluación de la Información Necesaria para el diagnóstico de una posible avulsión del Río Pilcomayo. *Informe Final*. Santa Fe: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Mestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.
- Cafaro, E., & Ramonell, C. (s.f.). Respuesta Morfológica a variaciones interanuales de Caudales en el río Pilcomayo, Gran Chaco. Cartagena de Indias, Colombia: XII Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1995). *Hidrología Aplicada*. McGraw hill Interamericana S.A.
- CIAT. (2014). Recuperado el 14 de 08 de 2014, de <http://dapa.ciat.cgiar.org/datos-de-elevacion-para-el-mundo/>
- Clausen, B., & Pearson, C. P. (1995). Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought'. *Journal of Hydrology*, N° 173 (111–130).
- Colegio Mayor Santo Tomás de Aquino. (19 de 01 de 2014). Obtenido de <http://www.santotomas.edu.bo/>
- Collischonn, W., & Tucci, C. E. (2003). Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. Porto Alegre: Revista Brasileira de Recursos Hídricos.
- Cordini, I. R. (1947). Los ríos Pilcomayo en la Región de Patiño. Buenos Aires: Dir. Minería y Geología. Anales I.
- Corral, M. (2010). *Estabilización del Cauce Principal y Márgenes del Río Pilcomayo en Segmentos Identificados como Puntos Críticos. Tramo: Hito 1 / D'Orbigny – Misión la Paz / Pozo Hondo. Córdoba*.
- Corral, M. (2012). *Términos de Referencia para el Proyecto de Intervenciones en las márgenes de los tramos Críticos. Córdoba*.
- Cristanchi, M. A., & Testa Tacchino, A. J. (Enero de 2014). Informe Interno, Campaña enero de 2014. Misión la Paz, Salta, Argentina.
- Cristanchi, M. A., & Testa Tacchino, A. J. (Julio de 2014). Informe Interno, Campaña Julio 2014. Córdoba.

- CTN - CCE. (1997). *Misión de Identificación y Análisis para el plan del Manejo Integrado - Geomorfología (Anexo 1)*. Comisión Trinacional para la Cuenca del Pilcomayo; Comisión de las Comunidades Europeas.
- De Lío, J. C., Brea, J. D., Jaime, P., & Spalletti, P. (Marzo de 2007). Estudios de Erosión, Transporte y Sedimentación en la Cuenca Alta del Río Pilcomayo. Ezeiza.
- De Simone, S. (2014). Contenido de Metales Pesados en Peces Capturados en el Río Pilcomayo. La Plata: VI Congreso Argentino de Limnología, Agua, Ambiente y Sociedad.
- Deltares. (2010). *Delft3D-FLOW: Simulation of multidimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*.
- Díaz, É. B. (2016). *Sequías Hidrológicas en la República Argentina y su*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exáctas, Físicas y Naturales.
- Díaz, É. B., & Testa Tacchino, A. J. (03 de 2014). Informe Interno - Curvas de Excedencia para VM y MLP.
- Dirección Ejecutiva, C. T. (05 de 01 de 2014). *Pilcomayo.net*. Obtenido de Pilcomayo.net
- ERSDAC. (2003). Aster reference Guide Version 1.0. Japón: Earth Remote Sensing Data Analysis Center.
- EVARSA. (Julio de 2007). Análisis Granulométrico y Determinación de la Concentración del Material en Suspensión de muestras líquidas en la Zona de Divagación del Río Pilcomayo.
- Farías, H. D. (1995). Fórmulas prácticas para el diseño de canales sin revestir en terrenos aluviales. (F. p. Agua, Ed.) Córdoba, España: Revista de Ingeniería del Agua. Vol. 2 Num. 3.
- Farías, H. D. (2008). Erosión General en Ríos Aluviales. *Revista de Ingeniería del Agua*, Vol. 15 N°2. Córdoba, España: Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua.
- Farías, H. D. (2011). Presentación de Clases - Hidráulica Fluvial - Maestría en Recursos Hídricos. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, FCEFyN.
- Farías, H. D., & Cafaro, E. (2010). Estabilización del Cauce Principal y Márgenes del Río Pilcomayo en Segmentos Identificados como Puntos Críticos Tramo: Misión la Paz/Pozo Hondo - El Pantalón.
- Fernandez, C. (04 de 02 de 2013). Discurso, Anuncio de Obras. Capital Federal.
- García, M. H. (2008). *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice*. ASCE Publications.

- García, M. H., Motta, D., Zhenduo, Z., Torres, G. R., Cafaro, E., & Ramonell, C. G. (Enero de 2014). Modelación del Río Pilcomayo en el área de Misión la Paz - Pozo Hondo (2º Informe de Avance). Santa Fé / Illinois, Argentina / USA.
- Gilard, O. (1996). *Recursos Hídricos de la Cuenca del Pilcomayo*. European Framework Group.
- Gobierno de la Provincia de Salta. (2013). Archivo Fotográfico. Salta.
- Guccione, M. J., Burford, M. F., & Kendall, M. G. (2009). Pemiscot Bayou, a large tributary of the Mississippi River and a possible failed avulsion. *Fluvial Sedimentology* VI, 211-220. Smith & Rogers. doi:10.1002/9781444304213.ch16
- Halcrow. (2010). *Obtención de información básica para la realización del estudio de prefactibilidad de la obra del dique distribuidor. Informe Final*.
- Halcrow, & Serman. (2007). *Línea Base Ambiental y Socioeconómica de la Cuenca del Río Pilcomayo*. Tarija, Bolivia.
- Halcrow-Serman. (2007). *Línea Base Ambiental y Socioeconómica del la cuenca del Río Pilcomayo*. Tarija, Bolivia: Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.
- Heller, P. L., & Paola, C. (1996). Downstream changes in alluvial architecture; an exploration of controls on channel-stacking patterns. *Journal of Sedimentary Research*, 66(2), 297-306. doi:10.1306/D4268333-2B26-11D7-8648000102C1865D
- Hopwood, H. J. (2003). Taponamiento progresivo del cauce del Río Pilcomayo.
- Iriondo, M. H. (2010). *Geología del Cuaternario en Argentina*. Santa Fe: Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino.
- Iriondo, M., Colombo, F., & Kröhling, D. (2000). El abanico aluvial del Pilcomayo, Chaco (Argentina - Bolivia - Paraguay): Características y significado sedimentario. *Geogaceta*, 28, 79-82.
- Jack Klzobzi, J., Ramette, M., & Roquero, C. (1997). *Misión de identificación y análisis para el Plan de Manejo Integrado - Fluviomorfología*.
- Khalid, M., & Bazoberry Otero, S. (1990). *Propuesta Preliminar Investigación: Erosión-Sedimentación*. La Paz.
- Klemes, V. (1986). Dilettantism in Hydrology: transition or destiny? *Water Resources Research*.
- Kopaliani, Z., & Georgievsky, V. (1993). *Informe Técnico - Río Pilcomayo*.
- Laboranti, C. (Enero de 2014). Informe Campaña Enero 2014 en Villamontes. Mesa Fluvial, UNLP.

- Lagranja, C. J. (2001). *Pilcomayo, Río de la Vida*. Formosa: Gobierno de la Provincia de Formosa.
- Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. (1995). *Fluvial Processes in Geomorphology*. New York: Doven Publications Inc.
- Makaske, B. (1998). Anastomosing rivers Forms, processes and sediments. *Nederlandse Geografische Studies*, 1-285.
- Makaske, B. (2001). Anastomosing rivers: A review of their classification, origin and sedimentary products. *Earth Science Reviews*, 53(3-4), 149-196. doi:10.1016/S0012-8252(00)00038-6
- Malbrunot, A. (2006). *Sedimentología de la cuenca alta del río Pilcomayo*. Proyecto de Gestión Integrada y Plan Maestro de la Cuenca del Río Pilcomayo.
- Malbrunot, A., & Amarilla, M. (2007). *Sedimentología De La Cuenca Alta Del Río Pilcomayo Aguas Arriba De Mision La Paz (Argentina)*. Tucumán: XXI° Congreso Nacional del Agua 2007.
- Martín Vide, J. P., Amarilla, M., Gamarra, M., & Zárate, F. (2007). Problema de sedimentación en el río Pilcomayo. *Tercer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*.
- Martinez Vega, J., & Martín isabel, M. P. (2010). *Teledetección y Medio Ambiente*. Madrid: España. Obtenido de http://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio_ambiente.pdf
- Menéndez, Á. (2014). Onda de Contaminación por Rotura de Diques de Colas en la Alta Cuenca del Río Pilcomayo.
- OEA. (1981). *Aprovechamiento Múltiple de la Cuenca del Río Pilcomayo 3a Fase*.
- OEA, BID, & PNUD. (1977). *Aprovechamiento Múltiple de la Cuenca del Río Pilcomayo - Vol II, Recursos Hídricos*.
- Orfeo, O. (2012). *Monitoreo del transporte de sedimentos del río Pilcomayo en las Provincias de Salta y Formosa, Argentina*. CECOAL - CONICET.
- OTT. (2008). Operating Instructions - Radar Sensor Velocity - OTT Kalesto V. Kempten.
- Pilgrim, D. H. (1975). Model evaluation, testing and parameter estimation in hydrology. In: Prediction in Catchment Hydrology. T.G.Chapman & F.X.Dunin.
- Pool, M. (1994). *Reporte de la Misión técnica al área del Río Pilcomayo - Repúblicas de Argentina y Paraguay*.
- Pool, M., & Van Duijne, J. (1996). *Informe final de la tercera misión de asistencia técnica enviada por la comisión de la UE a la zona del Pilcomayo*.

- Pool, M., Usai, E., & Baas, J. (1993). Estudio del Río Pilcomayo, Informe Final. Bruselas, Bélgica: EURAGRI temporary Association.
- Raudkivi, A. J., & Breusers, H. (1991). Scouring. *Hydraulic Structures Design Manual Series*, 2. (I. D. Manual, Recopilador) A. A. Balkema Publishers.
- Rey Balmaceda, R. C. (1979). Límites y Fronteras de la República Argentina. OIKOS.
- Rubín Marín, Á. (2006). Clasificación de presas y evaluación del riesgo con programa HEC-RAS. Minor Thesis. Catalunya, España: Minor Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental.
- Salúm Flecha, A. (1983). Historia Diplomática del Paraguay del Novecientos a la Paz del Chaco.
- Slingerland, R., & Smith, N. D. (2004). River Avulsions and their Deposits. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, 257-285. doi:10.1146/annurev.earth.32.101802.120201
- Spandre, R. (2005). Resultados de la Segunda Misión del Experto Europeo en Hidrogeología.
- Szupiany, R., García, M., Dominguez Rubén, L., Patalano, A., Latosinski, F., Testa Tacchino, A., . . . Rodriguez, A. (2014). Evaluación de Tecnologías para la Cuantificación de Caudales y Caracterización del Flujo en el Río Pilcomayo. Santiago, Chile: Congreso Latinoamericano de Hidráulica.
- Testa Tacchino, A. J. (2015). *Caracterización de desbordes del Río Pilcomayo entre Villamontes y Misión La Paz*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11086/1936>
- Testa Tacchino, A. J., Díaz, É. B., Baldissoni, C. M., Cristanchi, M. A., Pagot, M., Tarrab, L., . . . Rodriguez, A. (2014). Hidráulica del Río Pilcomayo en el tramo entre Villamontes y Misión La Paz: caracterización y restricciones. *XXVI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*.
- Törnqvist, T. E., & Bridge, J. S. (2002). Spatial variation of overbank aggradation rate and its influence on avulsion frequency. *Sedimentology*, 49(5), 891-905. doi:10.1046/j.1365-3091.2002.00478.x
- Tsakiris, G., Loukas, D., Pangalou, H., Vangelis, H., Tigkas, D., Rossi, G., & Cancelliere, A. (2007). Drought characterization. En *Drought management guidelines technical* (Vols. Capitulo 7. páginas 85-102). Zaragoza: CIHEAM.
- Tujchneider, O., Paris, M., Perez, M., & D'Elia, M. (2007). Estudio Hidrogeológico de la porción Apical del Abanico Aluvial del Río Pilcomayo, entre Ibibobo y Misión la Paz / Pozo Hondo (Argentina-Paraguay Y Bolivia). Santa Fé.
- USACE. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual. Washington.

USACE. (2010). HEC-RAS v. 4.1.0.

USACE. (2013). HEC-HMS 4.0.

USGS. (14 de 08 de 2014). *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 arc second (30m)*.
Obtenido de <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>

Wentworth, C. K. (1922). A Scale of Grade and Class terms for Clastic Sediments. 30, 377-392. *The Journal of Geology*. Obtenido de www.jstor.org/stable/30063207.

Anexo I: Aportes al conocimiento

Se presentan a continuación los artículos científicos y técnicos en los cuales ha participado el autor posteriormente a la defensa de la Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos.

- Andrés Rodríguez, Juan Carlos Bertoni, Alejo Testa Tacchino, Erica B. Díaz, Mariana Pagot, Marcelo Baldissoni, Mariano Corral **(2017)**: *Water Climate Modeling in Large Basins, Pilcomayo River Basin - International Hydraulic Challenges*. Asoc. Brasileira de Recursos Hídricos ABRH, Porto Alegre, Brasil. (En prensa).
- Alejo Testa Tacchino, Paolo Gyssels, Mariano Corral, Mariana Pagot, Constanza Vargas, Hector Daniel Farias, Andres Rodriguez. **(2016)** “*Modelación bidimensional del desborde El Chañaral del Río Pilcomayo*”. XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú.
- Alejo Testa Tacchino, Constanza Vargas, Mariano Corral, Mariana Pagot, Paolo Gyssels, Andrés Rodríguez. **(2015)** “Análisis de la crecida y desbordes de Río Pilcomayo del año 2014”, Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil, Puerto Rico. ISSN: 1535-0088.
- Alejo Testa Tacchino, Paolo Gyssels, Mariano Corral, Mariana Pagot, Constanza Vargas, Hector Daniel Farias, Andres Rodriguez. **(2016)** “*Modelación bidimensional del desborde El Chañaral del Río Pilcomayo*”. Aqua-Lac UNESCO, Montevideo, Uruguay, Vol. 8 - Nº. 2. ISSN: 1688-2873.
- Alejo Testa Tacchino, Constanza Vargas, Mariano Corral, Mariana Pagot, Andrés Rodríguez. **(2016)** “Determinación del caudal que activa el desborde denominado El Chañaral sobre el Río Pilcomayo”. Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Córdoba, Argentina. Vol. 3, Nº 2. ISSN: 2362-2539.